Aus dem Institut für Wissenschaftliche Mikroskopie
der Universität Tübingen
Direktor: Professor Dr. med. H. Haselmann

*

Eine Methode zur Darstellung von Oberflächenformen mit Hilfe des Moiré-Verfahrens am Beispiel zahnärztlicher Kiefermodelle

Inaugural-Dissertation

zur Erlangung des Doktorgrades
der Zahnheilkunde
dem Fachbereich Theoretische Medizin
der Eberhard-Karls-Universität
zu Tübingen

vorgelegt von

Wolfgang Tetzlaff
aus Tübingen

1978

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41536516_0074

Aus dem Institut für Wissenschaftliche Mikroskopie
der Universität Tübingen
Direktor: Professor Dr. med. H. Haselmann

*

Eine Methode zur Darstellung von Oberflächenformen mit Hilfe des Moiré-Verfahrens am Beispiel zahnärztlicher Kiefermodelle

Inaugural-Dissertation

zur Erlangung des Doktorgrades
der Zahnheilkunde
dem Fachbereich Theoretische Medizin
der Eberhard-Karls-Universität
zu Tübingen

vorgelegt von

Wolfgang Tetzlaff
aus Tübingen

1978

UNIV.
LEIDEN
BIBL.

Dekan: Prof. Dr. med. H.J. Mallach

1. Berichterstatter: Prof. Dr. med.. H. Haselmann

2. Berichterstatter: Prof. Dr. med. dent. E. Körber

I N H A L T S V E R Z E I C H N I S

1.	EINLEITUNG	S. 1
2.	LITERATURÜBERSICHT	S. 3
3.	FRAGESTELLUNG	S. 5
4.	INSTRUMENTE UND METHODEN	S. 7
4.1.	OPTISCHE GRUNDLAGEN DES MOIRÉ - EFFEKTS	S. 7
4.2.	APPARATUR	S. 12
4.2.1.	JUSTIERUNG UND EICHUNG DER APPARATUR	S. 14
4.3.	FOTOGRAFISCHE MATERIALIEN UND IHRE VERARBEITUNG	S. 15
4.4.	HERSTELLUNG DER GITTER	S. 16
5.	ERGEBNISSE	S. 17
5.1.	OPTISCHE ERSCHEINUNGEN	S. 17
5.1.1.	PERSPEKTIVE	S. 17
5.1.2.	LAGE DER MOIRÉ - LINIEN	S. 19
5.1.2.1.	Beleuchtung und Kamera haben denselben Abstand vom Gitter	S. 19
5.1.2.2.	Lichtquelle und Kamera haben einen unterschiedlichen Abstand vom Gitter	S. 22
5.1.3.	TIEFENAUSDEHNUNG	S. 24
5.1.4.	LINIENDICHTE	S. 30
5.1.5.	BEISPIELE	S. 30
5.2.	ÄNDERUNG DES VERSUCHSAUFBAUS	S. 35
5.2.1.	KAMERA	S. 35

5.2.2. BELEUCHTUNG S. 37
5.2.3. GITTER S. 39
5.2.4. OBJEKT S. 41
5.3. VERARBEITUNGSPROZESS S. 44
5.3.1. NEGATIVPROZESS S. 44
5.3.1.1. Filmformat S. 44
5.3.1.2. Empfindlichkeit S. 44
5.3.1.3. Gradation S. 45
5.3.1.4. Entwicklung S. 45
5.3.2. POSITIVPROZESS S. 45
5.4. BEISPIELE S. 45
5.5. MESSGENAUIGKEIT S. 50
5.6. AUSWERTUNG VON ISOHYPSENAUFNAHMEN S. 50
5.6.0.1. Kriterien für die Auswertbarkeit S. 51
5.6.0.2. Verdeutlichung der Höhenlinien S. 51
5.6.1. QUALITATIVE AUSWERTUNG S. 52
5.6.2. QUANTITATIVE AUSWERTUNG S. 52
5.6.2.1. Codierung S. 54
5.6.2.2. Schnittbilder S. 58
5.7. ANWENDUNG DES MOIRÉ - VERFAHRENS S. 60
5.7.1. FORMVERHALTEN EINER KUNSTSTOFFPROTHESE S. 60
5.7.2. VERGLEICH VON ABDRUCKMATERIALIEN S. 64
5.7.3. SCHLIFFFLÄCHEN S. 65

6. DISKUSSION S. 66

7. ZUSAMMENFASSUNG S. 68

8. LITERATURVERZEICHNIS S. 70

1. EINLEITUNG

Im Bereich seiner wissenschaftlichen Arbeit ist der Zahnmediziner in vielen Fällen darauf angewiesen, exakte Daten über die Lage eines bestimmten Punktes im Kiefer- und Gesichtsbereich zu erhalten.
Aufgrund solcher Daten ist es möglich, Besonderheiten oder Veränderungen im Aufbau des Gebißsystems festzustellen. So interessieren den Prothetiker Kauflächencharakteristika, den Kieferorthopäden Entwicklungs- und Wachstumsvorgänge und den Werkstoffkundler Formveränderungen eines Werkstückes. Jedes Gebiet braucht Meßwerte des Objekts in allen drei Dimensionen.

In der Zahnmedizin ermöglicht es die Kleinheit des Objekts, das Original oder einen Gipsabdruck davon aufzubewahren. Deshalb sind bisher wenig Anstrengungen gemacht worden, meßtechnische Verfahren in die Zahnmedizin einzuführen, die es erlauben, möglichst viele Daten des Objekts zu erfassen und tabellarisch oder kartografisch zu speichern, um sie so jederzeit einer vergleichenden metrischen Betrachtung zugänglich zu machen.
Es hat sich lediglich eingebürgert, die Entfernung bestimmter Meßpunkte voneinander oder von einer normierten Ebene festzuhalten oder entsprechende Winkel zu bestimmen. Vor allem in der Kieferorthopädie und der Prothetik sind Verfahren und zum Teil recht komplizierte Geräte bekannt, mit denen diese Aufgaben gelöst werden können.

Zur Darstellung von so vielgestaltigen Oberflächen wie denen der Zähne und der Mundhöhlen-Schleimhaut eignen sich kartografische Methoden wie sie z.B. in der Geodäsie üblich sind. Ziel dieser Methoden ist es, eine in den drei Dimensionen des Raumes geformte Oberfläche in eine zweidimensionale Abbildung zu überführen, so daß in dieser zweidimensionalen Abbildung die dritte Dimension des Raumes verschlüsselt

enthalten ist. Besonders anschaulich und zugleich informativ ist eine Darstellung mittels Isohypsen. Wird einem solchen Isohypsenbild ein Koordinatensystem zugeordnet, so lassen sich aus dem Bild ohne großen Aufwand die räumlichen Koordinaten eines beliebigen Punktes entnehmen. Aus den Koordinaten vieler Punkte ist die Konstruktion von Schnittbildern in jeder beliebigen Raumrichtung möglich. Von den Schnittbildern lassen sich wiederum Hoch- und Tiefpunkte, sowie Neigungen und Wölbungen bestimmen.
Durch die Isohypsendarstellung entsteht zugleich ein plastischer Effekt, der dem Betrachter die räumliche Vorstellung des Objekts erleichtert.

Es sind unterschiedliche Verfahren denkbar, mit denen sich aus einer räumlichen Vorlage eine Darstellung in Form von Isohypsen gewinnen läßt. In der Literatur sind verschiedene Methoden zu finden.

In der vorliegenden Arbeit wird versucht, mit Hilfe eines Verfahrens, das auf dem sogenannten Moiré - Effekt beruht, Modelloberflächen darzustellen und Veränderungen in der Oberflächenstruktur zu erkennen.

2. LITERATURÜBERSICHT

Es existieren sehr viele, nach recht verschiedenartigen Prinzipien arbeitende Verfahren zur Erfassung und Speicherung der dreidimensionalen Daten eines Objektes. Ihre Hauptanwendung finden diese Verfahren im Bereich der Geodäsie (FINSTERWALDER (8.), HOFMANN (9.)).
Große Bedeutung hat hier die Photogrammetrie zur Auswertung von stereoskopischen Bildern (SCHWIDEFSKY (16.), VIERLING (20.), LACMANN (12.)).
Mit Hilfe eines Stereokomparators lassen sich auf diese Weise Höhenlinienkarten anfertigen, die sehr genau sind.

Im Bereich der Zahnmedizin sind Verfahren interessant, die es erlauben, kleine Objekte dreidimensional darzustellen. Auch hier kann die Photogrammetrie angewendet werden (LACMANN (12.)).

FENEIS hält dagegen die photogrammetrische Methode nicht für geeignet zur Erfassung anatomischer Oberflächenstrukturen (EBERT (7.)). Er erreicht größere Genauigkeit durch die stereoskopische Vermessung des Objekts selbst. Das von ihm angegebene Verfahren hat eine Meßgenauigkeit von 10 µm. (EBERT (7.)). STEINHILBER (17.) hat die Methode von FENEIS zur kartografischen Darstellung menschlicher Zahnreihen benutzt. Die von ihm angefertigten Isohypsenbilder haben eine Äquidistanz von 250 µm.

Außer dem photogrammetrischen Verfahren in seinen verschiedenen Variationen gibt es noch eine Reihe anderer optischer Methoden, mit deren Hilfe sich die räumliche Form eines Objekts auf einem zweidimensionalen Träger speichern läßt. Die Anwendung von stark kohärentem Licht in Form von Laserstrahlen ermöglicht die Herstellung holografischer Aufnahmen, die bei der Betrachtung einen echten räumlichen Ein-

druck des aufgenommenen Objekts entstehen lassen.
Durch eine Variation des Verfahrens können auch Höhenlinien erzeugt werden (LENK (13.)).

LACMANN (12.) gibt das Lichtschnittverfahren an, bei dem ein streifenförmiges Gitter auf das Objekt projiziert wird. Dadurch werden Punkte gleicher Höhe durch helle Lichtbänder miteinander verbunden. Diese Methode läßt sich jedoch nur auf Außenflächen anwenden.

Die Interferenzmikroskopie nach dem Prinzip der NEWTON - Ringe ist ein sehr geeignetes Verfahren, um Höhenunterschiede im Bereich der Lichtwellenlänge zu messen. Da die Äquidistanz der Linien jedoch nicht stark variiert werden kann, eignet sich das Verfahren nicht zur Anwendung auf ein ganzes zahnärztliches Modell.

BROOKS und HEFLINGER (4.) geben eine Methode an, die Höhenlinien beliebiger Breite auf dem Objekt entstehen läßt. Bei diesem Verfahren werden zwei Laserstrahlen zur Interferenz gebracht. Diese Interferenzstreifen sind auf einem im Strahlengang befindlichen Objekt sichtbar und können fotografiert werden.
Eine ähnliche Methode benutzen TSURUTA und ITOH (19.) zur Höhenliniendarstellung von kleinen Objekten (in diesem Fall einer Münze).

TAKASAKI (18.) beschreibt eine andere Methode. Sie beruht auf dem Moiré - Effekt, der mit Hilfe eines Gitters erzeugt wird. TAKASAKI wendet die Methode auf größere Objekte an, beschreibt jedoch die Möglichkeit, auch kleinere Gegenstände darzustellen. Im Falle einer Münze verkleinert er die Äquidistanz auf 1/8 mm.

3. FRAGESTELLUNG

Um dem Zahnmediziner ein Instrument in die Hand zu geben, welches ihm erlaubt, Gebißmodelle oder Werkstoffe dreidimensional zu erfassen, soll versucht werden, ein Verfahren zu finden, mit dem es möglich ist, Höhenlinien auf diesen Objekten zu erzeugen.

Die Forderungen, die an das Verfahren gestellt werden, sind folgende:

Das Verfahren soll sich auf die Größenordnung zahnärztlicher Modelle umfassend und hinreichend genau anwenden lassen.

Das Verfahren soll in seiner Handhabung nicht zu kompliziert sein.

Die benutzten Instrumente sollen nicht zu aufwendig sein.

Die Ausnutzung des Moiré - Effektes bietet sich hierfür an. Mit der vorliegenden Arbeit soll untersucht werden, ob der Moiré - Effekt eine geeignete Methode für die kartografische Erfassung zahnärztlicher Modelle zu liefern vermag und wie ein geeigneter Versuchsaufbau für die Durchführung der Messungen aussehen soll.

Interessant ist, ob das Verfahren überhaupt die Grundlage für eine exakte Messung abgeben kann; falls ja, welche Genauigkeit das Verfahren besitzt und bis zu welcher Größenordnung und Tiefenausdehnung das Verfahren durchführbar ist.

Außerdem soll untersucht werden, in welcher Art und Weise die erhaltenen Meßaufnahmen am günstigsten verarbeitet und ausgewertet werden können.

An einem zahnmedizinischen Objekt soll schließlich exemplarisch dargestellt werden, welche Anwendungsmöglichkeiten sich für das Moiré - Verfahren im Bereich der Zahnmedizin ergeben.

4. INSTRUMENTE UND METHODEN

4.1. OPTISCHE GRUNDLAGEN DES MOIRÉ - EFFEKTS

Werden ähnliche periodische Muster einander überlagert, so entsteht ein neues Muster. Dieses Muster wird Moiré genannt (Abb. 4.1 - 1).

Bringt man zwei identische, strichförmige Gitter zur Deckung, so ergeben sich je nach Phasenverschiebung, aus großer Entfernung betrachtet, Grauwerte unterschiedlicher Stärke. Sind die Gitterstreifen gleich breit wie die Zwischenräume, variieren die Grauwerte zwischen dem Grauwert des einzelnen Gitters und einem völligen Schwarz (Abb. 4.1 - 2).

Beleuchtet man nun ein Objekt mit einem parallelen Lichtstrahl durch ein strichförmiges Gitter hindurch und betrachtet das Objekt durch dasselbe Gitter, jedoch unter einem anderen Winkel, so erscheinen auf dem Objekt Streifen unterschiedlicher Helligkeit, die sich periodisch wiederholen. Jeder Streifen verbindet Punkte gleicher Entfernung vom Gitter. Diese Erscheinung läßt sich dadurch erklären, daß sich die Projektion des Gitters, je nach seiner Entfernung vom Original, aus der Position des Beobachters gesehen, verschiebt. Diese Phasenverschiebung ist proportional der Entfernung h der jeweiligen Projektionsebene von der Gitterebene (Abb. 4.1. - 3).

Nach TAKASAKI (18.) gilt bei einem senkrecht blickenden Beobachter die Beziehung:

$$h = s_o \cdot N \cdot \cot \varphi$$

wobei s_o die Gitterkonstante, φ der Einfallswinkel des

Lichtes und N die Ordnungszahl der jeweiligen hellen Linie in Bezug zur Gitterebene ist.
Für $\varphi = 45^{o}$ vereinfacht sich die Beziehung:

$$h = s_o \cdot N$$

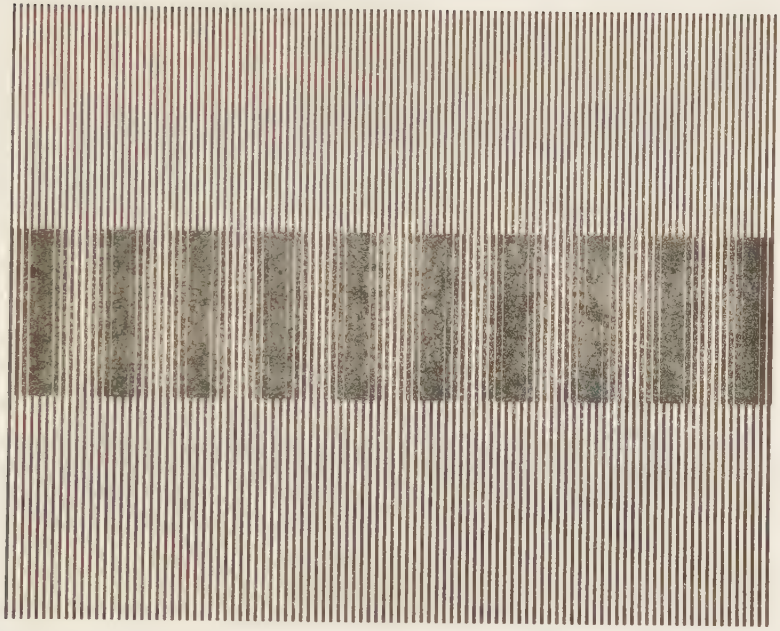


Abb. 4.1 - 1 Beispiel für das Entstehen eines Moiré durch die Überlagerung zweier Gitter mit ungleichen Gitterkonstanten.
Ein Gitter mit der Gitterkonstanten g_1 = 6,95 Linien/cm nimmt den oberen Teil des Bildfeldes ein, der untere Teil des Bildes besteht aus einem Gitter mit der Konstanten g_2 = 7,60 Linien/cm.
Im Mittelteil des Bildes überlappen sich die beiden Gitter, dies führt zur Entstehung eines Moiré, welches aus breiten Streifen mit einer Frequenz von $g_1 - g_2$ = 0,65 Linien/cm besteht.

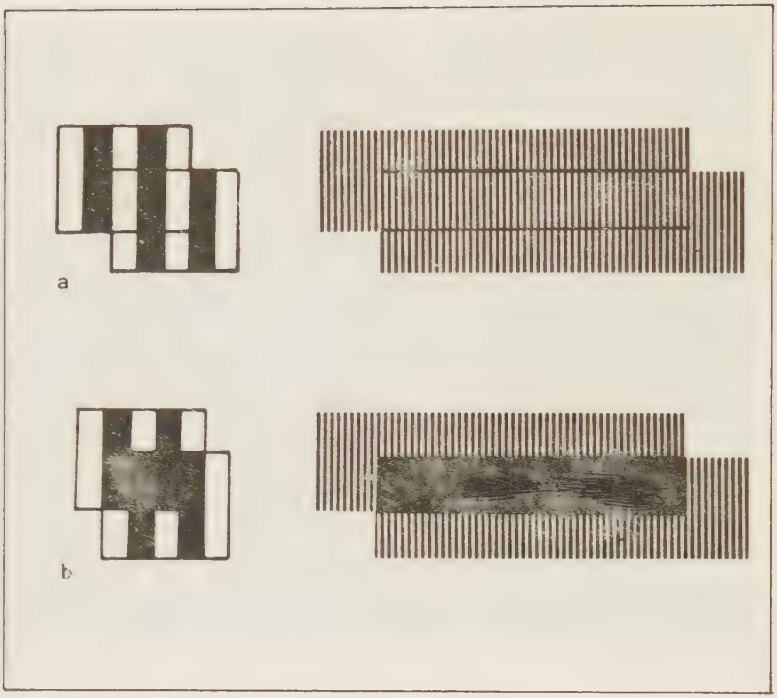


Abb. 4.1. - 2 Werden zwei Strichgitter mit identischen Gitterkonstanten einander überlagert, so resultiert - je nachdem, wie die einzelnen Gitterstriche zur Deckung kommen - ein Grauwert in der Überlagerungszone. Kommen die Gitterstriche, wie im Fall a), genau zur Deckung, so ergibt sich maximale Helligkeit. Bei einer Phasenverschiebung von 180^{o} wie bei Fall b), kommt es zur maximal möglichen Dunkelheit.

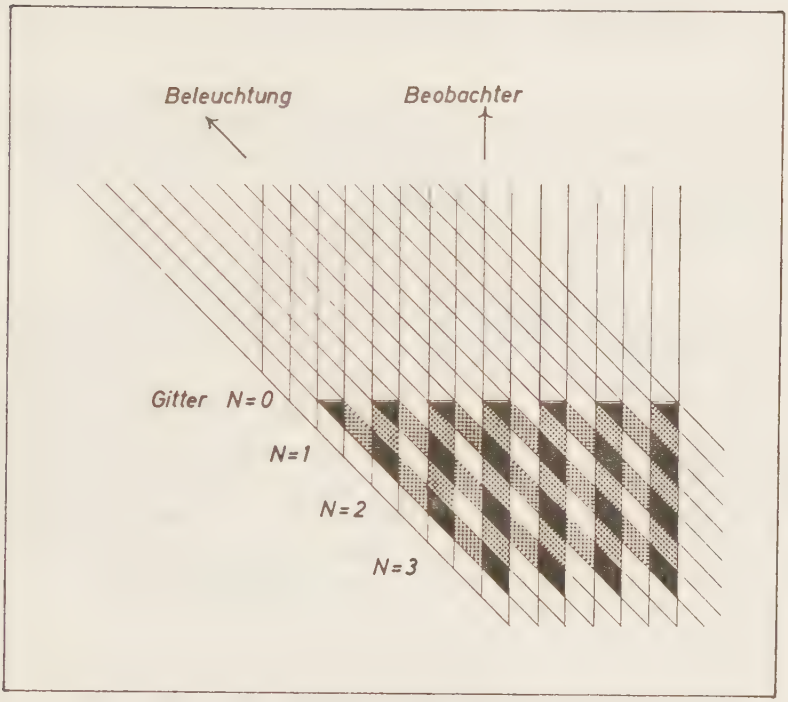


Abb. 4.1 - 3 Fällt Licht schräg auf ein Gitter, so sieht ein senkrecht blickender Beobachter Punkte gleicher Entfernung vom Gitter durch Linien gleicher Helligkeit verbunden. Dies ist dadurch zu erklären, daß sich das projizierte Gittermuster relativ zu dem vom Beobachter gesehenen Gittermuster verschiebt. Zu jeder Ebene, die parallel zum Gitter liegt, gehört eine ganz bestimmte Phasenverschiebung und damit ein bestimmter Helligkeitswert. Bei linearem Strahlengang wiederholen sich die Helligkeitswerte periodisch.

4.2. APPARATUR

Im Laufe der Untersuchung kommen verschiedene Versuchsaufbauten zur Anwendung, da festgestellt werden soll, welcher Aufbau sich als der günstigste erweist. Die Grundzüge des Aufbaus sind jedoch stets dieselben:

Auf einer optischen Bank ist eine Beleuchtungsanordnung montiert. Das Objekt ist am Ende der Bank in einer speziellen Halterung befestigt, mit der das Objekt um alle drei Achsen des Raumes gekippt werden kann. Direkt vor dem Objekt befindet sich das Gitter; dieses ist an einen Feintrieb montiert. Dieser Feintrieb gestattet Bewegungen parallel zur Gitterebene. Das Gitter schließt mit der Beleuchtungsachse einen Winkel von 45° ein. Orthogonal zur Gitterebene ist eine Kamera angeordnet. Große Irisblenden dienen zur Ausschaltung von Streulicht. Die Versuchsanordnung zeigt Abb. 4.2 - 1.

Folgende Geräte finden Verwendung:

Hochleistungsleuchte bestückt mit einer Quecksilberdampf - Höchstdrucklampe HBO 100 W/1
Fa. Zeiss, Oberkochen

He - Ne - Laser Typ LG 64
Fa. Siemens

Contaflex mit Tessar 1 : 2,8/50
und Proxar f = 0,2 m
Fa. Zeiss, Oberkochen

Exakta RTL 1000 mit Oreston 1 : 1,8/50
Westromat 1 : 3,5/135
und Balgengerät
Fa. Exakta, Dresden

Linhof Technika 9 x 12 mit Symmar 1 : 6,5/210
Planar 1 : 3,5/135
Luminar 1 : 6,3/100
Fa. N. Karpf KG, München 25

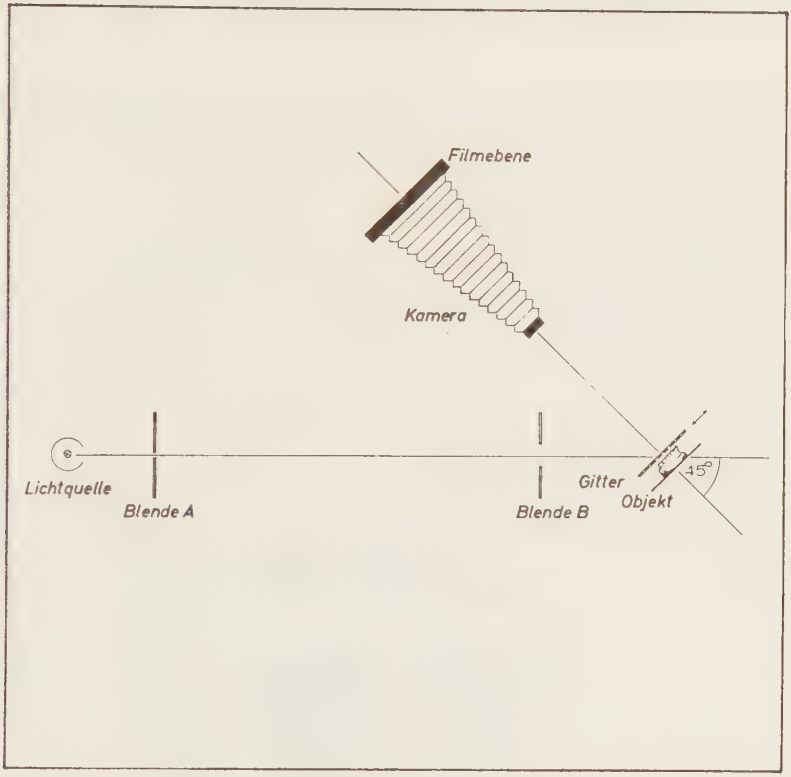


Abb. 4.2 - 1 Schema des Versuchsaufbaus.
Die Strahlengänge von Lichtquelle und Kamera schließen einen Winkel von 45° ein. Im Kreuzungspunkt der Strahlengänge liegt das Gitter, hinter dem das zu untersuchende Objekt angeordnet ist. Blende A liegt im Brennpunkt der Beleuchtungsoptik, Blende B dient der Ausschaltung von Streulicht.

4.2.1. JUSTIERUNG UND EICHUNG DER APPARATUR

Beleuchtung, Objekt und Kamera werden genau auf die gleiche Höhe eingestellt. Der Winkel zwischen Kamera und Beleuchtung beträgt 45°.
Das Gitter wird mit Hilfe einer Wasserwaage senkrecht ausgerichtet.
Die Apparatur steht auf einem erschütterungsarmen Tisch.
Zur Eichung dient ein Eichkörper aus Gips. Eine Seite ist plan und liegt dem Gitter an. In dieser planen Seite befindet sich eine prismenförmige Vertiefung definierter Abmessung (Abb. 4.2 - 2). Aus der Zahl der Linien, die auf einer Fläche des Prismas erscheinen, läßt sich der Abstand der einzelnen Linien bestimmen.

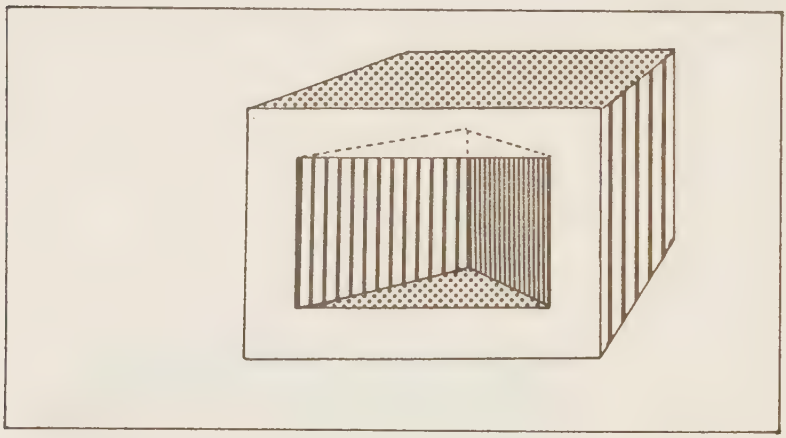


Abb. 4.2 - 2 Eichkörper. Er besitzt auf einer Seite eine prismenförmige Vertiefung, deren Abmessungen bekannt sind. Die Zahl der in dieser Vertiefung entstehenden Moiré - Linien gestattet Rückschlüsse auf den Abstand der einzelnen Linien.

4.3. FOTOGRAFISCHE MATERIALIEN UND IHRE VERARBEITUNG

Als Aufnahmematerial finden Verwendung:

Agfapan 25 für Kleinbildaufnahmen
Entwicklung: Rodinal 1 : 50, 12 min, 20° C

Agfapan 100 für Aufnahmen 9 x 12 (Planfilm)
Entwicklung: Rodinal 1 : 50, 15 min, 20° C
Rodinal 1 : 25, 8 min, 20° C

Positive werden gefertigt auf:

Agfa BN 1 und BH 1
Entwicklung: Neutol 1 : 7, 2 min, 20° C

(Filme, Papiere und Chemikalien: Fa. Agfa - Gevaert, Leverkusen)

Als Vergrößerungsapparate dienen:

Durst Laborator 54 mit Componon 1 : 5,6/150
Fa. Durst AG, Bozen/Italien

Leitz Focomat II_c mit Focotar 1 : 4,5/60
Fa. Leitz, Wetzlar

4.4. HERSTELLUNG DER GITTER

Die Herstellung der Gitter erfolgte durch fotografische Reproduktion eines Rasters (Fa. Letraset, England) mit Hilfe eines Reproduktionsgerätes (Traut Simplex, Fa. H. Traut, München Optik: Apo - Skopar 1 : 9/210).

Die Raster wurden auf Plattenmaterial der Größe 9 x 12 cm reproduziert (Gevalith - Ortho 08, Fa. Agfa - Gevaert, Antwerpen - Leverkusen).

Um wolkenlose Gitter zu erhalten, stellte sich folgendes Vorgehen als vorteilhaft heraus: Die Platten wurden überbelichtet und nach der Entwicklung mit FARMER'schem Abschwächer behandelt.

Zum Schutz der Schichtseite der Platten wurde mit Hilfe einer Kunststoffeinbettmasse (Depex, Serva - Heidelberg) ein Deckglas aufgebracht (vgl. Abb. 5.1.3. - 5).
Zur Ermittlung der Gitterkonstanten eignet sich eine Meßlupe. Ausgezählt wurde eine Strecke von 10 mm.

Als Untersuchungsmaterial dienten diverse zahnärztliche Modelle aus Gips und Kunststoff u.a. ein Thomasmodell, selbstgefertige geometrische Körper, Totalprothesen in Wachs und Kunststoff sowie Prothesenzähne.

4.5. UMFANG DER UNTERSUCHUNG

Es wurden 255 Versuchsaufnahmen gemacht, davon

153 auf Kleinbildfilm

102 auf Planfilm 9 x 12.

5. ERGEBNISSE

5.1. OPTISCHE ERSCHEINUNGEN

Auf Grund der optischen Gegebenheiten des Versuchsaufbaus zeigt die fotografische Abbildung des untersuchten Objektes mit den Moiré - Streifen Abweichungen von einem idealen Isohypsenbild. Diese Abweichungen sind auf verschiedene Faktoren zurückzuführen, die man kennen muß, um die Methode praktisch einsetzen zu können.

5.1.1. PERSPEKTIVE

Im angegebenen Versuchsaufbau haben der Beobachter, bzw. die Kamera einen endlichen Standpunkt gegenüber dem Objekt. Die fotografische Aufnahme unterliegt demzufolge einer perspektivischen Verzeichnung, die eine einfache metrische Auswertung einer einzelnen Moiré - Linie nicht zuläßt. Es gelten die Gesetze der Zentralprojektion. Nimmt man die am nächsten zum Betrachter gelegene, von einer Moiré - Linie umschlossene Fläche als Bezugsebene, so sind alle folgenden, von Moiré - Linien umschlossenen Flächen im Vergleich zu ihrer wahren Ausdehnung verkleinert.

Der Grad der perspektivischen Verkleinerung ist vom Winkel abhängig, unter dem das Objekt der Kamera erscheint. Dieser Winkel wird von der Brennweite des Objektivs und vom Vergrößerungsmaßstab bestimmt. Die exakten Werte für den Grad der Verzeichnung können nach dem Strahlensatz berechnet oder aus einem Diagramm (Abb. 5.1.1. - 1) entnommen werden. Da bei einem Höhenlinienbild der Abstand eines

Punktes zur Bezugsebene bekannt ist, kann auf diese Weise sein realer Abstand zur optischen Achse bestimmt werden.

Bei Verwendung eines Objektivs mit langer Brennweite lassen sich die durch perspektivische Verzeichnungen entstehenden Abweichungen weitgehend herabsetzen. Soll eine fotografische Aufnahme jedoch exakt ausgewertet werden, so ist es notwendig, jede einzelne Isohypse oder zumindest die interessierenden Punkte in ihrer Lage zu korrigieren.

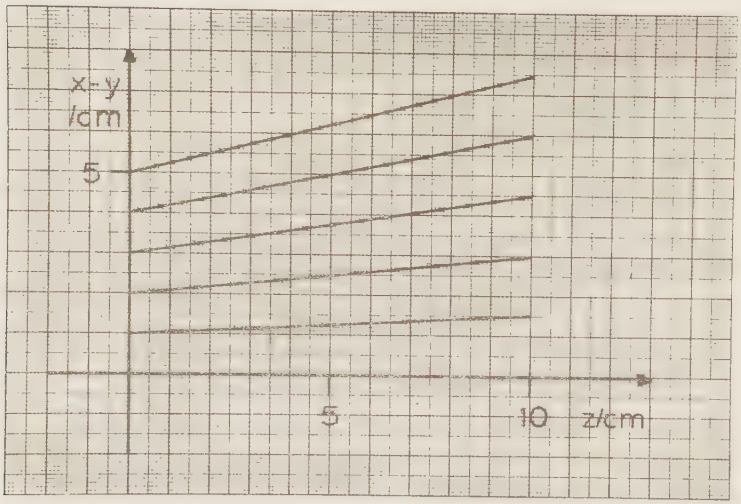


Abb. 5.1.1. - 1 Diagramm zur Bestimmung der perspektivischen Abweichungen. Angenommen ist eine Entfernung der Kamera von 20 cm gegenüber der Bezugsebene.
(Bei einem Vergrößerungsmaßstab von 1:1 entspricht dies einer Brennweite von 10 cm.)
Die Größenveränderung der Meßstrecke x-y kann als Funktion der Entfernung z von der Bezugsebene (z=0) entnommen werden.

5.1.2. LAGE DER MOIRÉ - LINIEN

Um ein Moiré zu erhalten, bei dem die einzelnen Linien parallel und in gleichem Abstand zueinander verlaufen, muß der Strahlengang auf der Beleuchtungs- und auf der Kameraseite parallel sein (vgl. Abb. 4.1. - 3). Da diese Bedingungen in der Praxis jedoch nicht erfüllt werden können, soll hier berechnet werden, in welcher Art und Weise sich die Lage der Moiré - Linien durch Veränderungen des Kamera-und des Lichtquellenstandpunktes ändert.

5.1.2.1. Beleuchtung und Kamera haben denselben Abstand vom Gitter

Punkte S eines Objektes, die durch eine Moiré - Linie verbunden sind, weisen folgende Gemeinsamkeit auf: Die Verbindungsgeraden dieser Punkte mit der Kamera K haben in der Gitterebene stets denselben Abstand G von den Verbindungsgeraden der Punkte mit der Lichtquelle L. Dies erklärt sich aus dem Entstehungsmechanismus der Moiré - Linien.

Führt man ein Koordinatensystem ein, ergibt sich die in Abb. 5.1.2. - 1 wiedergegebene Situation.

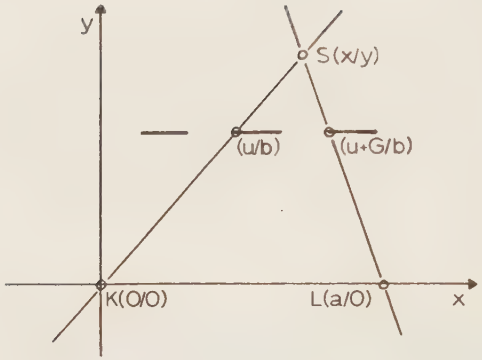


Abb. 5.1.2. - 1

Dabei ist: a der Abstand der Lichtquelle von der Kamera

b der Abstand von Lichtquelle und Kamera zum Gitter

u die Entfernung eines Gitterstriches von der optischen Achse der Kamera

G der Abstand zweier Gitterstriche.Je größer dieser Abstand ist, desto weiter ist die betreffende Moiré - Linie vom Gitter entfernt

Die "Kameragerade" y_K hat die Gleichung

$$y_K = \frac{b}{u} \cdot x$$

Die "Lichtgerade" y_L hat die Gleichung

$$y_L = \frac{b}{u+G-a} \cdot x - \frac{ba}{u+G-a}$$

Für den Schnittpunkt ergibt sich somit folgende Beziehung:

$$y_S = \frac{ba}{a-G}$$

y_S ist unabhängig von u, die Moiré - Linien liegen also parallel zum Gitter.

y_S ist jedoch nicht proportional zu G. Das bedeutet, daß die Moiré - Linien keinen konstanten Abstand voneinander haben.

Für verschiedene Werte von G zeigt Abb. 5.1.2. - 2 die Lage der Höhenlinien in Bezug zum Gitter.

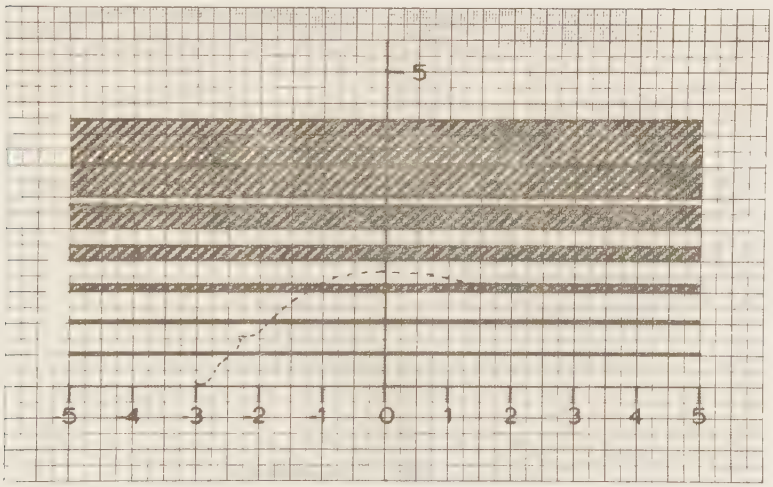


Abb. 5.1.2. - 2 Lage der Moiré - Linien in Bezug zur Gitterebene für a = 20 cm und b = 20 cm. Die Werte entsprechen einer realen Situation. Durch die schraffierten Flächen sind die Differenzen zum Verlauf idealer Höhenlinien wiedergegeben.
Mit wachsender Entfernung vom Gitter werden die Abweichungen immer größer.
(Der Schnitt durch ein zahnärztliches Modell ist lagerichtig eingezeichnet.)

5.1.2.2. Lichtquelle und Kamera haben einen unterschiedlichen Abstand vom Gitter

Liegen Lichtquelle und Kamera nicht auf einer zum Gitter parallelen Ebene, so ändern sich die Verhältnisse folgendermaßen: Die Lichtquelle liegt jetzt um den Betrag c hinter der Kamera (Abb. 5.1.2. - 3).

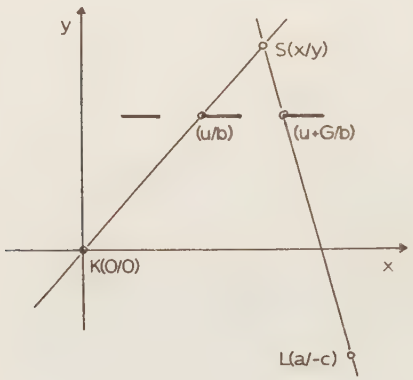


Abb. 5.1.2. - 3

Berechnet man die Koordinaten des Schnittpunktes, so zeigt sich, daß y_S nun von u abhängig ist:

$$y_S = \frac{cu + cG + ba}{a - G + \frac{cu}{b}}$$

Die Moiré - Linien liegen in diesem Fall also nicht mehr parallel zum Gitter.

In einem Diagramm ist die Lage der Moiré - Linien in Abhängigkeit von u aufgetragen (Abb. 5.1.2. - 4).

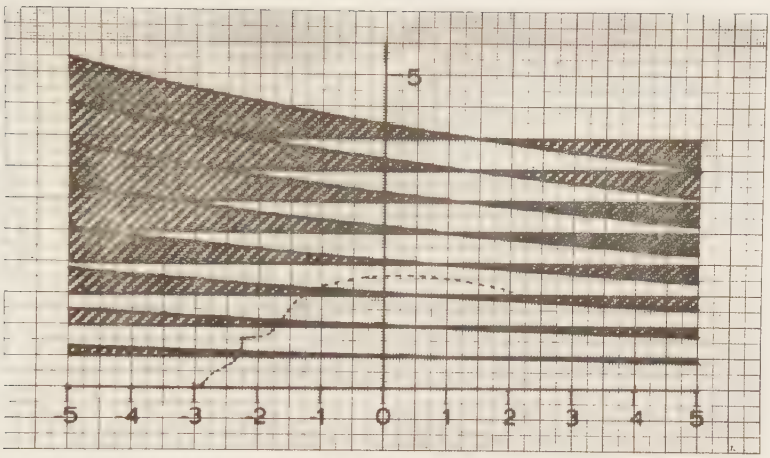


Abb. 5.1.2. - 4 Lagebeziehung der Moiré - Linien zum Gitter, wenn a = 76 cm, b = 20 cm und c = 56 cm.
Die Werte entsprechen einer realen Situation. Durch die schraffierten Flächen ist die Differenz im Verlauf der Moiré - Linien zur Lage idealer Höhenlinien wiedergegeben. (Die gestrichelte Linie bezeichnet das Schnittbild durch ein zahnärztliches Modell.)

5.1.3. TIEFENAUSDEHNUNG

Moiré - Linien treten nicht in jeder beliebigen Entfernung vom Gitter auf, sondern sie werden in einer bestimmten Tiefe unscharf und verschwinden schließlich.
Dies liegt zum Teil daran, daß Lichtquelle und Kamera weder eine punktförmige Öffnung, noch unendlichen Abstand vom Objekt haben. Ihre Apertur stellt einen begrenzenden Faktor für die Tiefenausdehnung der Moiré - Linien dar.

Zur Berechnung der Tiefenausdehnung stellt man sich vor, daß zwei Punkte eines Gitters mit dem Abstand G durch eine Lichtquelle der Ausdehnung d beleuchtet werden. Die Lichtquelle hat den Abstand s zum Gitter (Abb. 5.1.3. - 1).

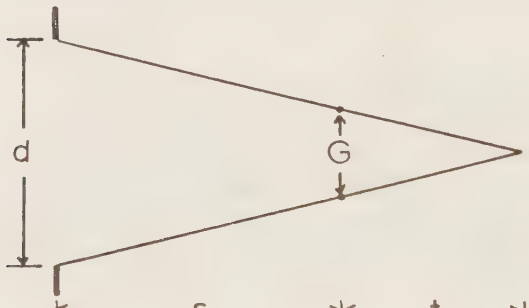


Abb. 5.1.3. - 1

Nimmt man an, daß die Projektion der Punkte dann nicht mehr voneinander getrennt werden kann, sobald die Punkte aufeinander projiziert werden, so gilt:

$$t_{max} = \frac{s}{d} \cdot G$$

Für die Aufnahmeapparatur kann man die Gleichung umformen, dabei ist Bl die Blendenzahl und M der Vergrößerungsmaßstab

$$t_{max} = \frac{M + 1}{M} \cdot G \cdot Bl$$

Die Tiefenausdehnung ist also proportional zum Durchmesser s der Lichtquelle, bzw. zur eingestellten Blendenzahl der Kamera.

Ein Beispiel für den Einfluß der Apertur geben die Abbildungen 5.1.3. - 5 und 6. Bei beiden Bildfolgen wurde jeweils die Blende verkleinert. Dies führt dazu, daß die einzelnen Moiré - Linien schärfer werden und mit steigender Blendenzahl immer größere Bereiche des Modells erfassen. Abb. 5.1.3. - 5 wurde mir parallelem Licht gemacht, Abb. 5.1.3. - 6 dagegen mit divergierendem Licht. Durch das Arbeiten mit parallelem Licht wird die Apertur des Beleuchtungssystems vergrößert. Dies führt zu einer verminderten Tiefenausdehnung der Moiré - Linien bei jeweils gleicher Blendeneinstellung.

An einem Keil wurde die Tiefenausdehnung von Moiré - Linien in Abhängigkeit vom Öffnungsverhältnis des Kameraobjektivs gemessen. Zu erwarten ist eine Kurve, die sich asymptotisch einem Wert nähert, der durch die Apertur der Lichtquelle bestimmt wird.
Aus den gemessenen Werten kann jedoch keine eindeutige Kurve gezeichnet werden (Abb. 5.1.3. - 2). Die Abweichungen sind wohl darauf zurückzuführen, daß die Tiefenausdehnung der Moiré - Linien durch die Tiefenschärfe der Optik und durch Beugungserscheinungen beeinflußt wird.

Vor allem bei Gittern mit kleiner Gitterkonstante sind die Tiefen, bis zu denen Moiré - Linien erzeugt werden können, sehr gering.
In Abb. 5.1.3. - 3 sind die absoluten Werte aufgetragen, die mit verschiedenen erprobten Gittern bei gleicher Blendeneinstellung erreicht werden können.
Die stark differierenden Werte sind ein Zeichen dafür, daß die Tiefenausdehnung in großem Maße von der Qualität der verwendeten Gitter abhängt. Diese Qualitätsunterschiede sind im Herstellungsprozeß der Gitter begründet (vgl. Abschn. 4.4.).

Die Schärfe der Moiré - Linien wird wohl durch Streuungs-, Beugungs- und Brechungseffekte an den verschiedenen Schichten des Gitters beeinträchtigt (Abb. 5.1.3. - 4).

Die Auswertung der Versuchsaufnahmen zeigt, daß Gitter mit einer Gitterkonstanten von g = 160 µm noch die Darstellung von Moiré - Linien auf den Gaumenpartien eines Gebißmodells erlauben. Voraussetzung sind jedoch hochwertige Gitter und optimale Aufnahmebedingungen.

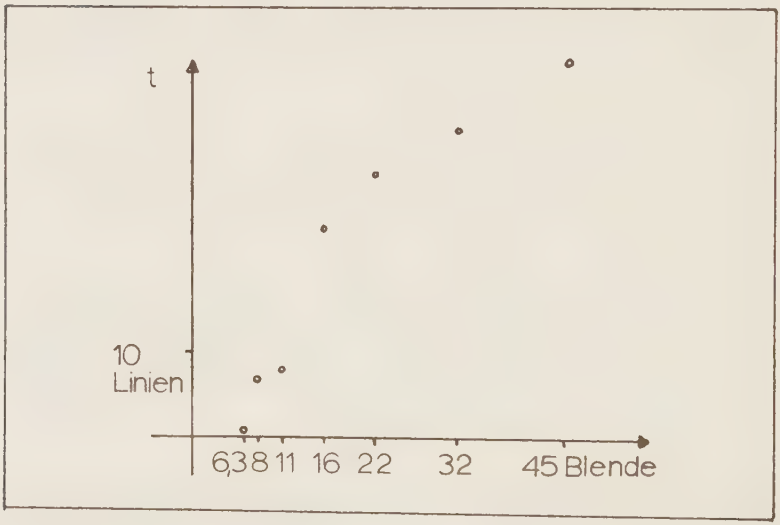


Abb. 5.1.3. - 2 Tiefenausdehnung der Moiré - Linien in Abhängigkeit von der Blendenzahl. An den Moiré - Aufnahmen eines Prismas wurde festgestellt, wieviele Linien bei einer bestimmten Blendeneinstellung der Kamera noch erkannt werden können.

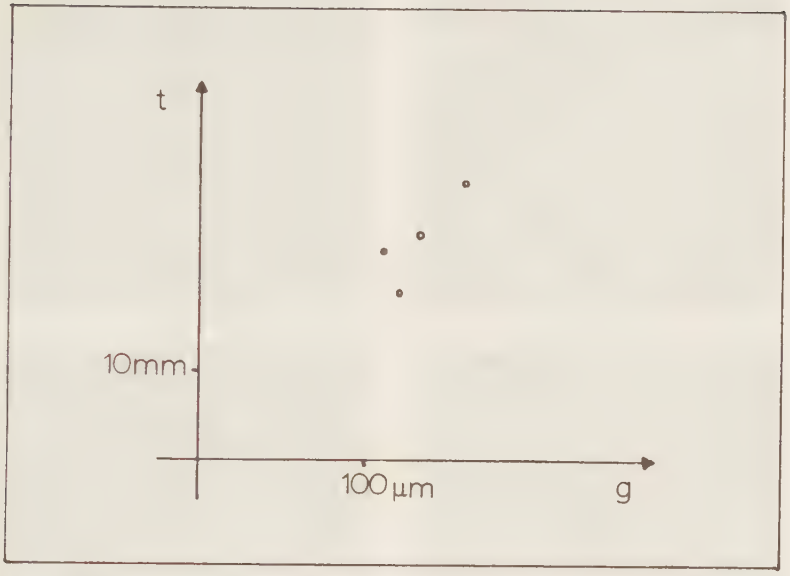


Abb. 5.1.3. - 3 Abhängigkeit der Tiefenausdehnung der Moiré - Linien von der Gitterkonstanten. Bei konstanter Blendeneinstellung wurde die Tiefe bestimmt, bis zu der sich mit verschiedenen Gittern Linien auf einem Prisma erzeugen lassen. Die Werte ergeben keinen eindeutigen Zusammenhang zwischen Gitterkonstante und Tiefenausdehnung von Moiré - Linien.

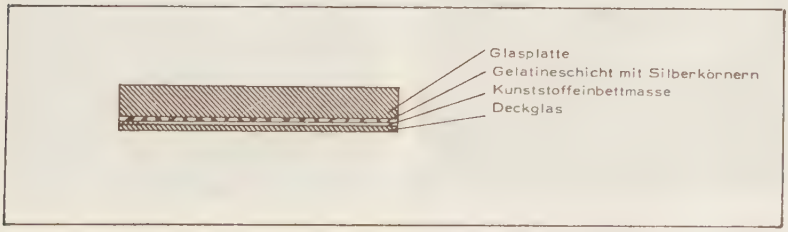
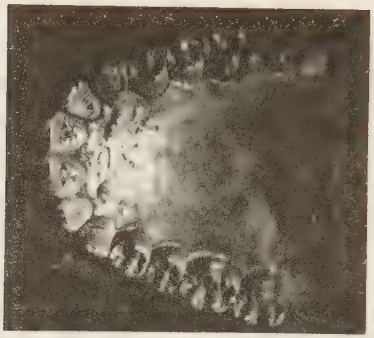
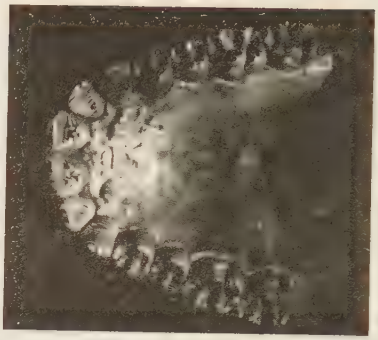


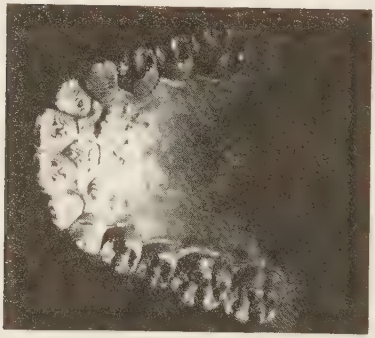
Abb. 5.1.3. - 4 Aufbau der verwendeten Gitter



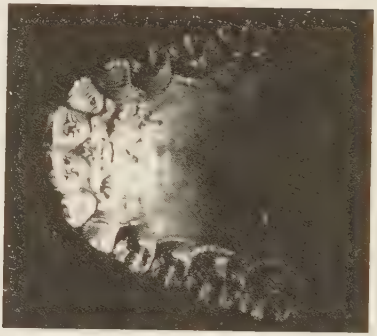
Bl. 4 1/8 sec.



Bl. 5,6 1/4 sec.

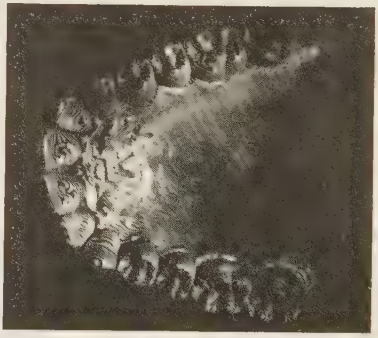


Bl. 8 1/2 sec.



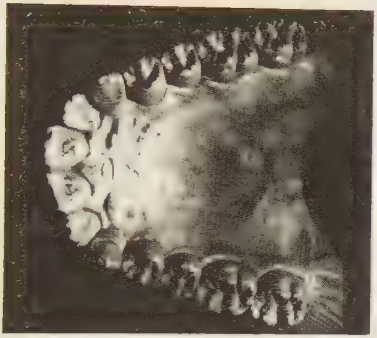
Bl. 11 1 sec.

Bl. 16 2 sec.

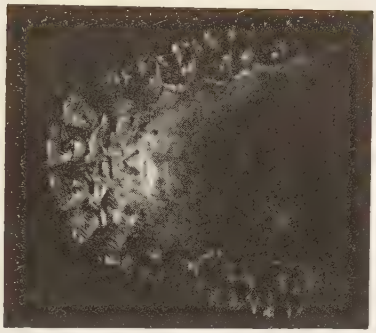


Bl. 22 4 sec.

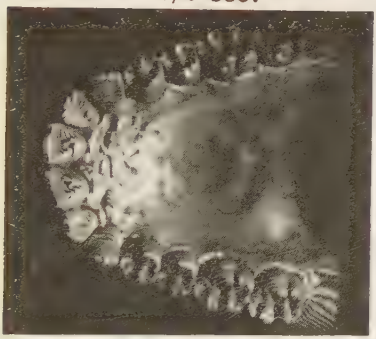
Abb. 5.1.3.- 2 Tiefendausdehnung der Moiré - Linien bei steigender Blendenzahl und parallelem Strahlengang



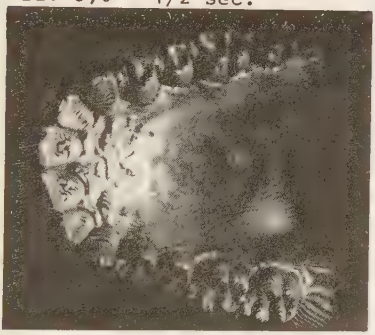
Bl. 4 1/4 sec.



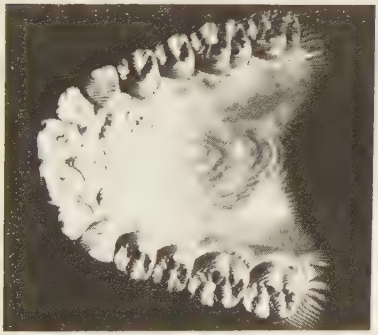
Bl. 5,6 1/2 sec.



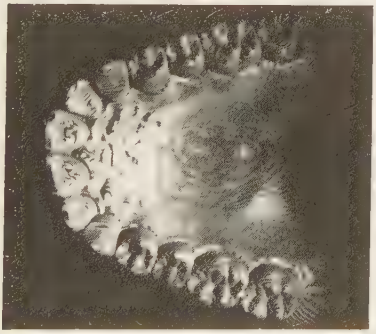
Bl. 8 1 sec.



Bl. 11 2 sec.



Bl. 16 4 sec.



Bl. 22 8 sec.

Abb. 5.1.3. - 3 Tiefenausdehnung der Moiré - Linien bei steigender Blendenzahl und divergierendem Lichtstrahlengang

5.1.4. LINIENDICHTE

Die Dichte der Moiré - Linien auf dem fotografischen Träger hängt ab von der Gitterkonstanten, der Neigung der abgebildeten Fläche und dem Vergrößerungsmaßstab der Aufnahme.

Um eine Moiré - Aufnahme auswerten zu können, müssen auch nah beieinanderliegende Linien auf dem Negativ noch getrennt wiedergegeben werden. Die Zahl der Linien, die auf dem Negativ zu finden sind, wird durch das Auflösungsvermögen des Films und die Qualität der optischen Abbildung begrenzt.

An einer Zylinderfläche kann die maximal mögliche Dichte von Moiré - Linien bestimmt werden, die vom Aufnahmesystem noch erfaßt werden kann (Abb. 5.1.5. - 2). Für einen Film der Empfindlichkeit 100 ASA wurde die maximal mögliche Liniendichte mit 12 Linien/mm gemessen. Dieser vergleichsweise kleine Wert läßt sich dadurch erklären, daß die Moiré - Linien fließende Übergänge mit geringen Kontraständerungen aufweisen. Die Liniendichte ist jedoch ausreichend, um z.B. bei einer Gitterkonstanten von g = 0,03 cm eine Steigung von 1 : 3,6 zu erfassen.

5.1.5. BEISPIELE

Der Moiré - Effekt soll nun auf einige geometrisch einfache Körper angewandt werden. Die auf den Körpern entstandenen Linien sind in Beziehung zu konstruierten Höhenlinien, die den Idealfall repräsentieren, gesetzt.

Aus dem Vergleich zeigt sich, daß die Moiré - Linien ziemlich genau dem Verlauf der konstruierten Linien entsprechen, obwohl sich auf ihren Verlauf perspektivische und optische Verzeichnungen, wie sie in den vorausgegangenen Abschnitten beschrieben wurden, auswirken (Abb. 5.1.5. - 1 bis 3).

Abb. 5.1.5. - 1 bis 3 Die Moiré - Aufnahmen verschiedener einfacher geometrischer Körper sind in Beziehung gesetzt zu zeichnerisch konstruierten Höhenlinienbildern dieser Objekte. Es zeigt sich, daß die Moiré - Linien nur geringe Abweichungen in ihrem Verlauf zeigen.

5.1.5. - 1 Ebene, 30° zum Gitter geneigt

5.1.5. - 2 Zylinder, Ø = 3,27 cm

5.1.5. - 3 Kugel, Ø = 2,28 cm

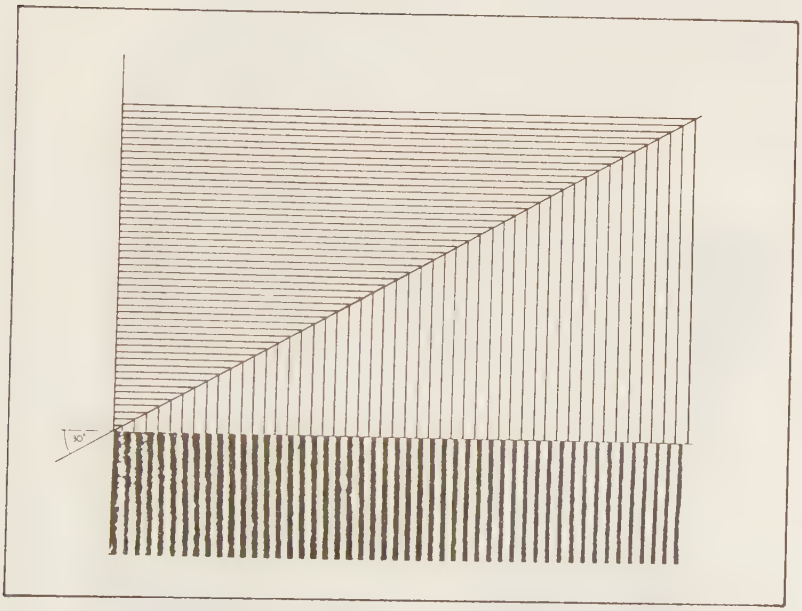


Abb. 5.1.5. - 1

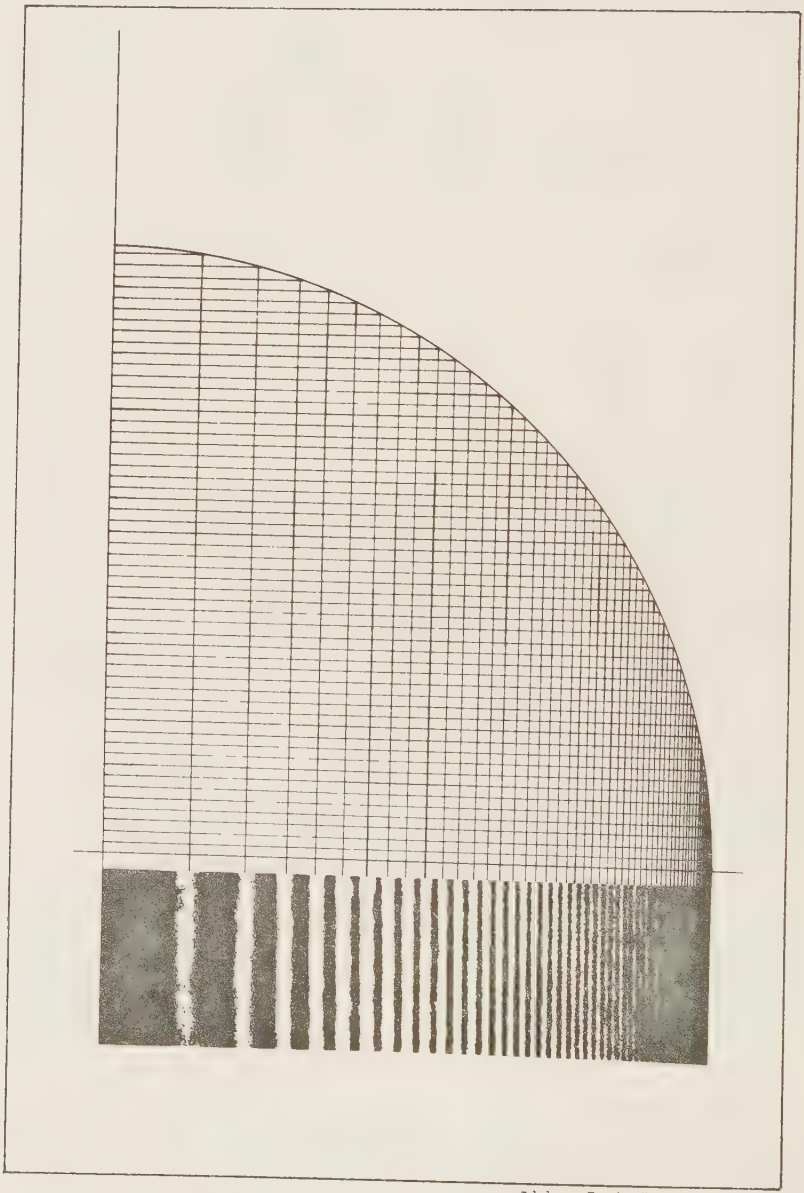


Abb. 5.1.5. - 2

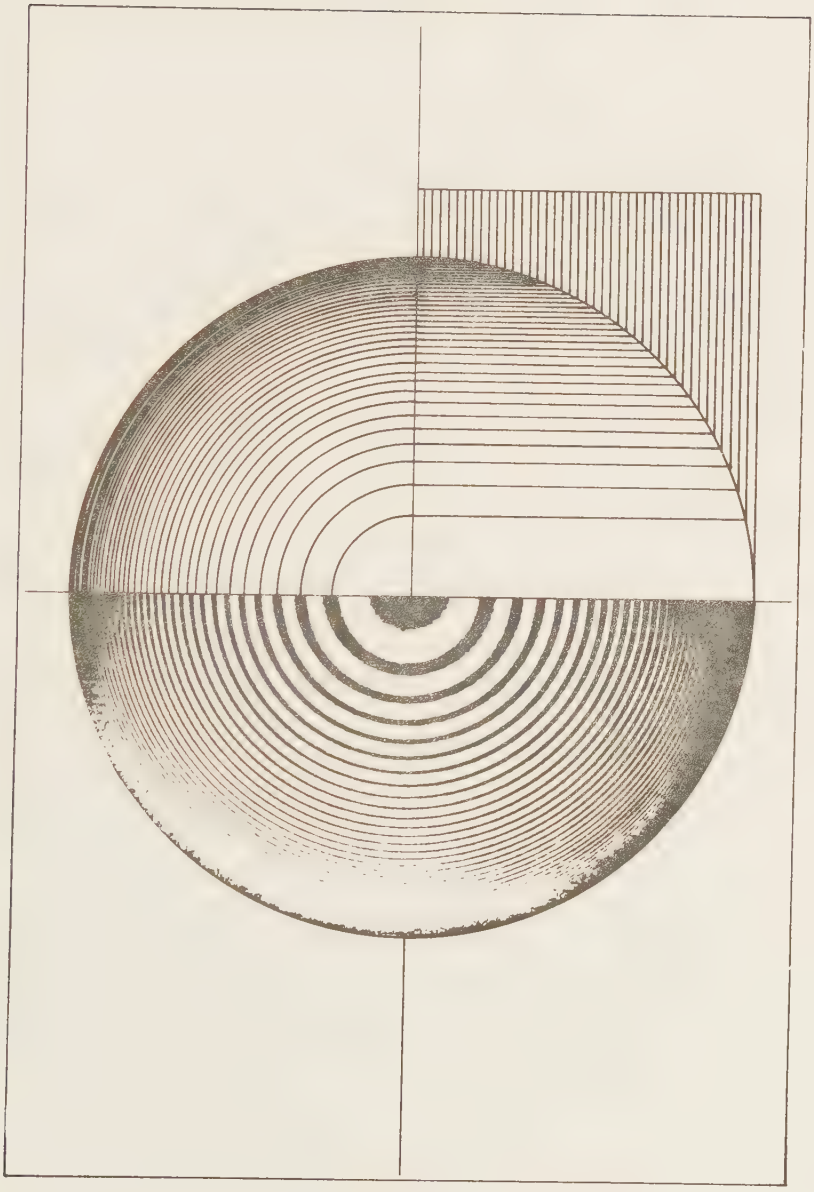


Abb. 5.1.5. - 3

5.2. ÄNDERUNG DES VERSUCHSAUFBAUS

Durch Variation der Bestandteile des Versuchsaufbaus soll geklärt werden, welchen Einfluß die einzelnen Komponenten auf das Gesamtergebnis ausüben. Die Qualität der erhaltenen Aufnahmen wird danach beurteilt, wie gut sie ein zahnärztliches Modell zur Darstellung zu bringen vermögen. Als Kriterium zur Beurteilung einer bestimmten Anordnung dient außerdem der zeitliche und technische Aufwand, mit dem sich die Ergebnisse erzielen lassen.

5.2.1. KAMERA

Drei Kameraarten standen zur Verfügung:
Eine einäugige Kleinbildkamera mit fest eingebauter Optik und Vorsatzlinse, eine Kleinbildkamera mit Wechseloptik und Balgengerät, sowie eine Großbildkamera im Format 9 x 12 cm mit allen Möglichkeiten der Einstellung.

Bei der Durchführung von Versuchsaufnahmen stellte sich folgendes heraus:
Eine Kleinbildkamera mit Wechseloptik ist unbedingt einer solchen mit festeingebauter Optik vorzuziehen, da sich hier viel umfangreichere Einstellungsmöglichkeiten ergeben. Für die Kleinbildkamera im Vergleich mit der Großbildkamera spricht ihre Handlichkeit und die einfache Verarbeitung des Filmmaterials. Die Großbildkamera bietet dagegen ein hohes Auflösungsvermögen des Films bedingt durch ihr Filmformat. Die belichteten Filme können individuell verarbeitet werden und ermöglichen die direkte Auswertung ohne den Umweg über das Positiv. Nachteilig wirkt sich dagegen beim Großformat aus, daß hier mit einem Vergrößerungsmaßstab von ca. 1 : 1 gearbeitet werden muß (vgl. Abschn. 5.1.3.).

Soll die Qualität der Aufnahmen nicht leiden, muß eine speziell korrigierte Nahoptik verwendet werden.
Die durch den Vergrößerungsmaßstab verringerte Tiefenschärfe ist ebenfalls ein Nachteil; er muß durch Verkleinerung der Blende ausgeglichen werden. Durch den starken Vergrößerungsmaßstab bedingt, verlängern sich außerdem die Belichtungszeiten.

An den einzelnen Kameratypen wurde mit verschiedenen Objektiven unterschiedlicher Brennweite gearbeitet. Alle Objektive entsprachen den an sie gestellten Anforderungen.

Besonders geeignet erschien ein "Luminar", ein speziell für den Nahbereich korrigiertes mikrophotographisches Objektiv.
Von besonderer Bedeutung für die Auswertbarkeit der Aufnahmen ist die Brennweite der Optik. Von ihr hängt sowohl die perspektivische Verzeichnung des Objekts, wie auch die Lage der Moiré - Linien im Raum ab (vgl. Abschn. 5.1.).
Bei einer kurzen Brennweite wird ein großer Tiefenschärfebereich erreicht. Günstiger ist jedoch die Verwendung einer Optik mit langer Brennweite, weil dadurch Verzeichnungen der Moiré - Linien in nicht so großem Maße auftreten.

Die Belichtungszeit hat keinen oder nur einen sehr geringen Einfluß auf die Qualität der Aufnahme. Sie sollte genügend lang sein, damit bei einer Bewegung des Gitters (vgl. Abschn. 5.2.3.) die einzelnen Gitterstreifen nicht mehr auf der Aufnahme sichtbar sind. So lassen sich auf Kosten der Belichtungszeit einige andere Faktoren variieren. Zu beachten ist bei langen Belichtungszeiten die zusätzliche Verlängerung durch den SCHWARZSCHILD-Effekt.

5.2.2. BELEUCHTUNG

Die Forderungen, die an die Lichtquelle gestellt werden, sind

ausreichende Helligkeit
kleiner Leuchtfelddurchmesser
paralleler Strahlengang des austretenden Lichtes

Ein versuchsweise eingesetzter Laser eignete sich wegen seiner geringen Helligkeit und seiner hohen Kohärenz nicht zur Herstellung eines Moiré. Sehr gut bewährte sich dagegen eine Quecksilberdampflampe. Sie besitzt eine sehr hohe Leuchtdichte bei kleinem Leuchtfelddurchmesser.

Versuche, mit Hilfe einer Linse kolliminiertes Licht zu erzeugen, führten dazu, daß sich die Tiefenausdehnung der Moiré - Linien verkleinerte. Deshalb wird mit divergierendem Lichtstrahl gearbeitet; durch ausreichend große Entfernung vom Objekt läßt sich ein annähernd paralleler Strahlengang erzeugen.

Streulicht kann durch die Verwendung von Kulissenblenden und schwarzen Tüchern ausgeschaltet werden. Eine geeignete Beleuchtungsanordnung zeigt Abb. 5.2. - 1.
Um den Einfluß störender Lichtquellen auszuschalten, muß in einem verdunkelten Raum gearbeitet werden.

Der Versuch, geringgradige Reflexionen am Gitter durch ein Polaristionsfilter zu dämpfen, führte zu keiner wesentlichen Verbesserung der Bildqualität.

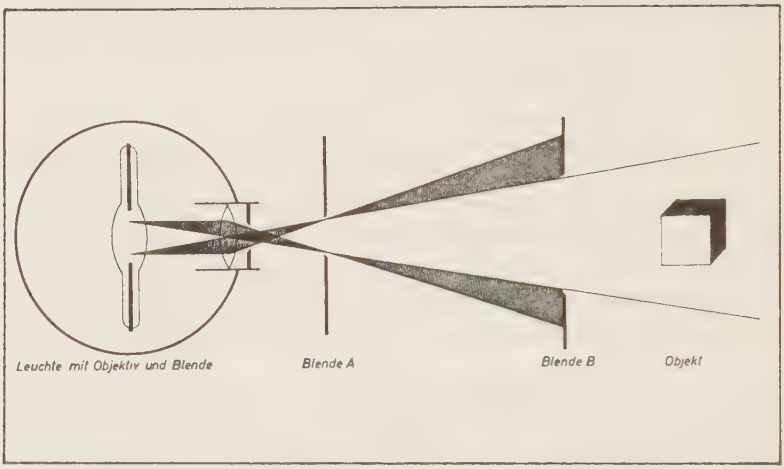


Abb. 5.2. - 1 Beleuchtungsanordnung, welche sich im Laufe der Untersuchung als besonders günstig erwiesen hat. Sie besteht aus einer Quecksilberdampfhöchstdrucklampe HBO 100 W, einem Objekt und zwei Kulissenblenden zur Ausschaltung von Streulicht.

5.2.3. GITTER

Die zur Darstellung eines zahnärztlichen Modells geeigneten Gitterkonstanten variieren zwischen 0,01 - 0,05 cm. Gitter mit großer Gitterkonstante geben alle Bereiche des Modells wieder. Die Linien sind scharf und klar voneinander zu trennen. Die Herstellung solcher Gitter ist einfach, und bei der Aufnahme muß der genauen Einstellung des Gitters und der Vermeidung von Erschütterungen nicht so viel Aufmerksamkeit geschenkt werden, wie bei feinen Gittern. Auch die Auswertung der Aufnahmen ist hierbei einfach. Gitter mit Gitterkonstanten kleiner als 0,02 cm bieten dagegen einige Schwierigkeiten. Die Herstellung erfordert erhebliche Sorgfalt. Soll ihre Verwendung zu guten Ergebnissen führen, ist eine optimale Einstellung der Aufnahmeapparatur notwendig.

Wird das Gitter bei der Aufnahme nicht bewegt, so erscheinen die Gitterstriche auf dem Film als störende Streifen. Diese Gitterstriche überlagern sich außerdem mit den Moiré - Linien, so daß ein zusätzliches, unerwünschtes Moiré in Erscheinung tritt. Eine Aufnahme mit stationärem Gitter zeigt Abb. 5.2. - 2.

Um diese störenden Effekte auszuschalten, ist es notwendig, das Gitter in seiner Ebene horizontal zu verschieben. Die Belichtungszeit muß dabei ausreichend lang sein, damit das Gitter mit Sicherheit nicht abgebildet wird. Bei dieser Bewegung des Gitters ist darauf zu achten, daß diese exakt in der Gitterebene erfolgt. Die Moiré - Linien wandern sonst auf dem Objekt und die Aufnahme zeigt unscharfe Linien. Das Wandern der Moiré - Linien kann z.B. an den Höckerspitzen bemerkt werden.

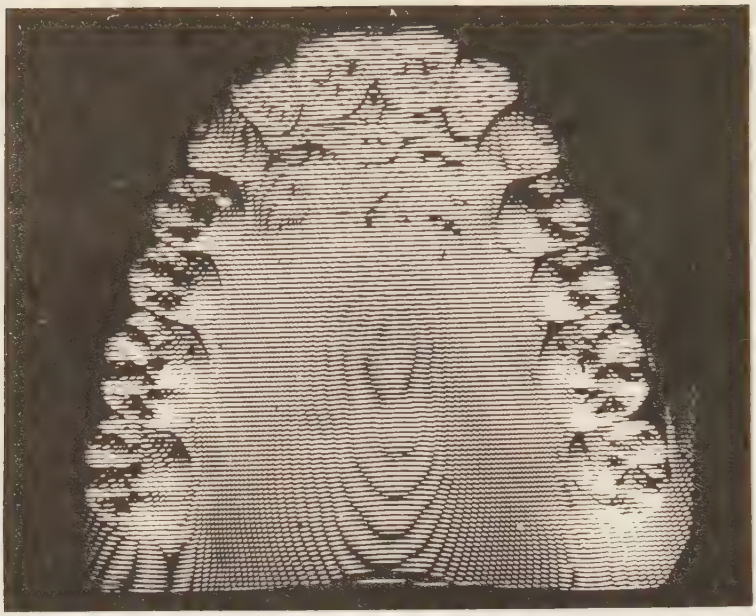


Abb. 5.2. - 2 Moiré - Aufnahme eines Gebißmodellls mit stationärem Gitter. Die Gitterstriche verdecken das Moiré, so daß es fast nicht zu erkennen ist. Außerdem tritt ein störendes Moirē in Erscheinung, welches z.B. in den vorderen Bereichen des harten Gaumens zu erkennen ist.

5.2.4. OBJEKT

Die Objekte, die im zahnärztlichen Bereich zur Untersuchung anstehen, sind im allgemeinen Gebißmodelle oder Werkstücke ähnlicher Oberflächengestalt, wie z.B. Zahnersatz. Diese Untersuchungsobjekte können aus recht unterschiedlichen Materialien bestehen.
Um eine genaue Abbildung zu erzielen, müssen die Charakteristika in Form und Material berücksichtigt werden.

Die Moiré - Linien laufen parallel zum Gitter, dessen Stellung vorgegeben ist. Das Objekt muß zu dieser Bezugsebene so orientiert werden, daß die Moiré - Linien die wesentlichen Details des Objekts sinnvoll erfassen. Es kann auch durchaus erforderlich sein, von einem Objekt zwei verschiedene Ansichten aufzunehmen.
Handelt sich es um ein symmetrisches Objekt, ist es günstig, die Symmetrieachse senkrecht zur Bezugsebene verlaufen zu lassen. Weiterhin ist es sinnvoll, die Bezugsebene parallel zu einer genormten zahnärztlichen Ebene zu legen. Bei Gebißmodellen bietet sich die Kauebene an. Um eine exakte Reposition zu gewährleisten oder Vergleiche zu ermöglichen, läßt man am besten die mesiopalatinale Höckerspitze des 6er und die palatinale Spitze des 4er dem Gitter aufliegen.

Damit perspektivische Verzeichnungen ausgeglichen werden können, sollte die optische Achse des Aufnahmesystems stets durch denselben Punkt des Objektes gelegt werden. Bei den vorliegenden Aufnahmen war dies der Punkt zwischen den beiden 5ern.

Das einfallende Licht soll auf dem Objekt möglichst wenige Schatten werfen. Eine Variationsmöglichkeit in der Lage der Lichtquelle besteht nicht. Deshalb muß die Stellung des Objektes entsprechend verändert werden. Bei der Aufnahme von Gebißmodellen gelingt die Ausschaltung von Schlag-

schatten am besten dadurch, daß die Median - Sagittal - Ebene des Modells horizontal gelegt wird. Das Licht fällt dann von posterior ein, und es wird eine symmetrische und schattenarme Ausleuchtung erzielt.

Bei der Auswertung einer Moiré - Aufnahme können Schwierigkeiten auftreten, wenn es nicht gelingt, zwischen allen Partien des abgebildeten Objekts einen räumlichen Bezug herzustellen. So gelingt es bei Gebißmodellen oft nicht, die Moiré - Linien auf den einzelnen Kauflächen in Beziehung zueinander zu setzen, da keine Linie zu erkennen ist, die sich kontinuierlich von einem Zahn zum anderen zieht.

Hier kann man Abhilfe schaffen, indem man aus Wachs oder einem ähnlichen Material kleine Brücken zwischen den einzelnen Zähnen baut (Abb. 5.2. - 3)

Auf diesen Brücken zeichnen sich dann in der Aufnahme einige Moiré - Linien ab, so daß eine Kontinuität der Moiré - Bilder im Bereich der Kauflächen hergestellt ist.

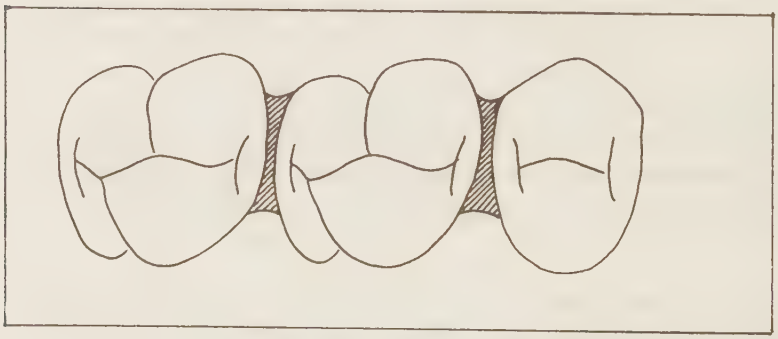


Abb. 5.2. - 3 Lage von kleinen Wachsbrücken, anhand derer die Moiré - Bilder der einzelnen Kauflächen in Relation zueinander gesetzt werden können.

Damit kontrastreiche Moiré - Linien ohne Spiegelung entstehen, sollte das Modell eine helle, matte Oberfläche besitzen. Modelle aus Weißgips erfüllen diese Forderung. Auf glatten, spiegelnden Oberflächen, wie z.B. Kunststoff, Metall, Wachs oder poliertem Gips läßt sich jedoch kein deutliches Moiré erzeugen. Hier ist eine Oberflächenbehandlung notwendig. Die Forderungen an eine Oberflächenbeschichtung sind, außer den oben genannten, folgende:

einfache Applikation
sofortige Weiterverarbeitung
leichte Entfernbarkeit
geringe Schichtdicke
keine Oberflächennivellierung

Ein Mattlack erwies sich für die Oberflächenbehandlung als nicht brauchbar. Versuche mit Talkum ohne und mit Haftvermittler brachten ebenfalls keine guten Ergebnisse, da das Talkum nicht gleichmäßig aufzubringen war und sich vor allem in Vertiefungen absetzte.

Als geradezu ideal erwies sich dagegen eine Bedampfung der Oberfläche mit Magnesiumoxid. Dieses Verfahren liefert eine sehr dünne, gleichmäßige Schicht auf dem Objekt. Das Magnesiumoxid läßt sich auf allen Oberflächen ohne Beschädigung aufbringen und mit einem Tuch wieder abwischen. Lediglich bei Wachs ergeben sich bedingt durch den niedrigen Schmelzpunkt des Wachses beim Aufdampfen gewisse Schwierigkeiten.

Das Aufbringen der Magnesiumoxidschicht geschieht folgendermaßen: Magnesiumband wird in einem Winkel von ca. 45 Grad schräg nach unten befestigt und mit einer heißen Flamme zur Entzündung gebracht. Das Objekt braucht nur kurz über dem entstehenden Rauch geschwenkt werden, um eine ausreichende Beschichtung zu erzielen. Auch bei Gipsmodellen empfiehlt sich dieses Verfahren.

Aus der Moiré - Aufnahme einer beschädigten Magnesiumoxidschicht läßt sich die Schichtdicke abschätzen.
Sie beträgt weniger als 10 µm.

5.3. VERARBEITUNGSPROZESS

Neben dem eigentlichen Aufnahmeverfahren hat auch die Wahl des fotografischen Materials und seine Verarbeitung einen nicht zu unterschätzenden Einfluß auf die Qualität der Moiré - Darstellung.

5.3.1. NEGATIVPROZESS

5.3.1.1. Filmformat

Das Filmformat ist von der jeweiligen Kamera abhängig. Je größer das Format gewählt wird, desto mehr Information kann auf dem Film gespeichert werden, da die Körnigkeit des Films nur eine bestimmte Informationsdichte zuläßt. Vor allem bei Objekten mit stark geneigten Flächen, die in der Abbildung eine hohe Liniendichte aufweisen, wirkt sich ein großes Format als Vorteil aus.

5.3.1.2. Empfindlichkeit

Da das Filmkorn die Informationsdichte eines Filmmaterials begrenzt, sollte für Moiré-Aufnahmen ein Material mit geringer Korngröße gewählt werden. Diese Eigenschaft besitzen vor allem niedrig empfindliche Filme.

5.3.1.3. Gradation

Wird eine steile Gradation gewählt, lassen sich dunkle und helle Linien des Moiré gut voneinander trennen. Da die Moiré - Linien jedoch mit unterschiedlicher Helligkeit auf dem Objekt auftauchen, wird durch einen Film mit steiler Gradation nur ein Teil der Linien abgebildet. Deshalb sollte ein Negativ mit flacher Gradationskurve angestrebt werden, auf dem die Moiré - Linien in allen Bereichen zu sehen sind.

5.3.1.4. Entwicklung

Die Filmentwicklung soll feinkörnige Negative mit einem Gamma von 0,7 liefern.

5.3.2. POSITIVPROZESS

Können die Negative nicht direkt ausgewertet werden, so werden Vergrößerungen auf Positivpapier angefertigt. Hierbei sollte man einen nicht zu kleinen Maßstab wählen, damit die Auswertung erleichtert wird. Empfehlenswert ist eine glänzende Papieroberfläche, da sie Kontraste am besten wiedergibt.

5.4. BEISPIELE

Anhand einiger fotografischer Aufnahmen soll das Moiré - Verfahren demonstriert werden. Die Aufnahmen zeigen Gesamt- und Teilansichten eines Oberkiefer-Modells. Filmformat, Objektive und Gitter sind variiert.

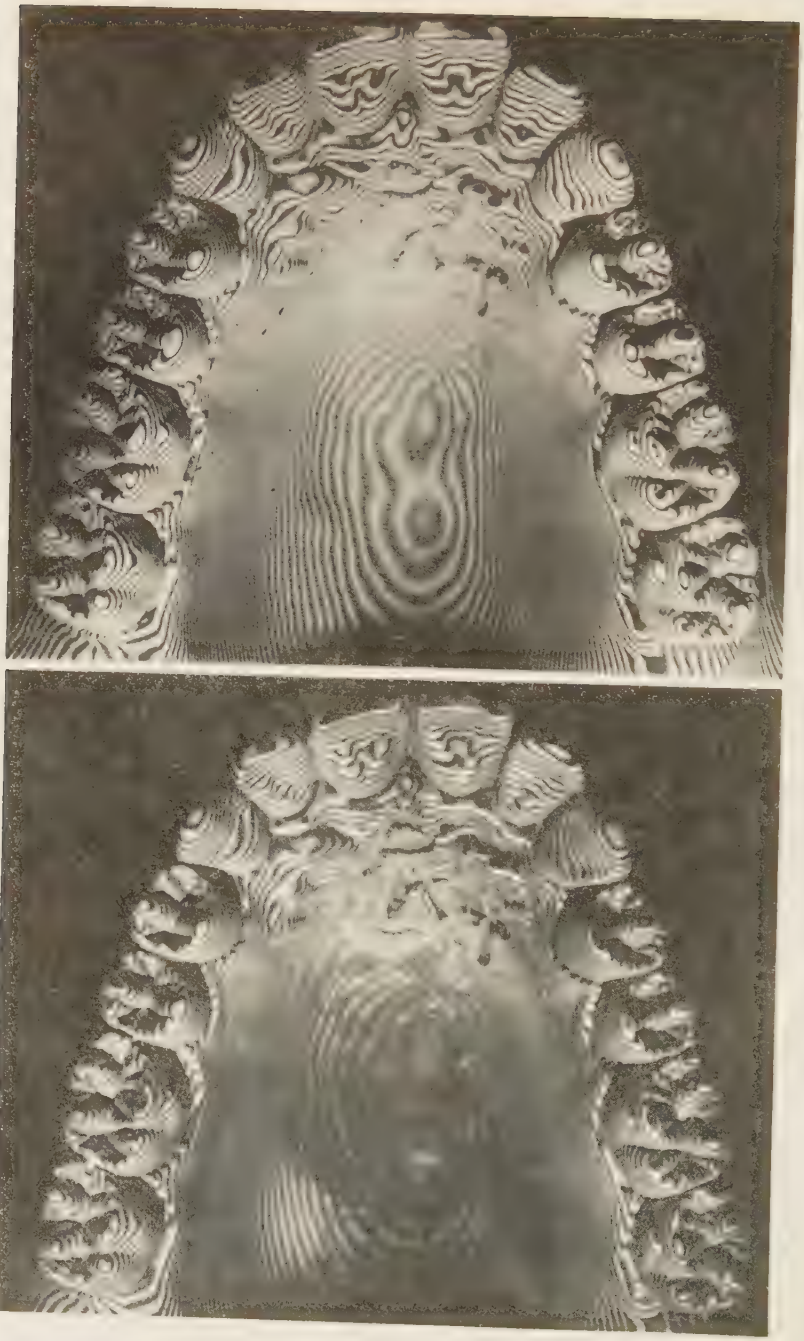


Abb. 5.4. - 1 Aufnahme 9 x 12 cm mit
Linhof Technika und Luminar 1 : 6,3/100
g = 0,030 cm
Blendenzahl: 60 Belichtungszeit: 120 sec
Agfapan 100
Modell mit Magnesiumoxid bedampft

Abb. 5.4. - 2 Kleinbildaufnahme mit Exakta und Westromat
1 : 3,5/135
g = 0,030 cm
Blendenzahl: 22 Belichtungszeit: 13 sec
Agfapan 25
unbedampftes Modell

Abb. 5.4. - 3 Aufnahme 9 x 12 cm mit
Linhof und Symmar 1 : 5,6/210
g = 0,016 cm
Blendenzahl: 45 Belichtungszeit: 360 sec
Agfapan 100
Modell bedampft
Mit diesen Gitterkonstanten ist es gerade noch möglich, die Gaumenpartien des Modells abzubilden. Die Wiedergabe steiler Flächen scheitert am Auflösungsvermögen des Films.

Abb. 5.4. - 4 Ausschnittsvergrößerung einer Aufnahme
9 x 12 cm
mit Linhof Technika und Luminar 1 : 6,3/100
g = 0,012 cm
Blendenzahl: 60 Belichtungszeit: 120 sec
Agfapan 100
Modell bedampft
Die Charakteristika der Kauflächen lassen sich mit kleinen Gitterkonstanten gut erfassen.

5.5. MESSGENAUIGKEIT

Bei der Bestimmung der Höhendifferenz zweier Punkte in einem Moiré - Bild gelingt es, die Differenz auf ein Viertel der Äquidistanz genau anzugeben. Bei einer Gitterkonstanten von 0,01 cm ist die Meßgenauigkeit also 25 µm. Günstig gelegene Punkte können auch noch genauer bestimmt werden.

Anhand einiger Vergleichsaufnahmen wurde geklärt, mit welcher Genauigkeit sich Moiré - Aufnahmen reproduzieren lassen. Die Messung der Lage eines bestimmten Punktes auf vier verschiedenen Aufnahmen ergab eine Standardabweichung von 0,35 Linien.

5.6. AUSWERTUNG VON ISOHYPSENAUFNAHMEN

Die ausgearbeiteten Aufnahmen enthalten zwar alle gesuchten Informationen über die Oberflächenstruktur des abgebildeten Objektes; diese Informationen sind jedoch nicht sofort entnehmbar. Deshalb müssen die Aufnahmen einem weiteren Verarbeitungsprozeß unterzogen werden.
Ziel dieses Prozesses ist es, die in dem Bild enthaltenen Informationen zu verdeutlichen oder einzelne Informationen zu isolieren, d.h. von unbedeutenden Informationen zu befreien.

Das Verfahren der Auswertung hängt von der Fragestellung ab, unter der ein Objekt untersucht wird. Hier sind deshalb nur einige grundlegende Methoden angegeben, nach denen bei der Auswertung vorgegangen werden kann.

5.6.0.1. Kriterien für die Auswertbarkeit

Um eine Moiré - Aufnahme auswerten zu können, muß sie scharfe und klar voneinander zu trennende Linien aufweisen. Über das ganze Objekt deutlich abgrenzbare Moiré - Linien sind jedoch nur mit großen Gitterkonstanten zu erzielen. Dies führt jedoch zu einem weitgehenden Verlust an Detailinformationen.

Bereits bei der Herstellung der Aufnahme muß man sich im Klaren sein, was man von dem Bild erwartet:
Hohe Informationsdichte oder die Möglichkeit einer einfachen Auswertung. In manchen Fällen wird es auch sinnvoll sein, Aufnahmen mit verschiedenen Gitterkonstanten zu machen.

5.6.0.2. Verdeutlichung der Höhenlinien

Die Moiré - Linien sind dadurch gekennzeichnet, daß sie keine scharfen Übergänge aufweisen. Sie sind vielmehr aus Grauwerten zusammengesetzt, die sich vom Rand bis zur Mitte der Linie kontinuierlich ändern. Die exakte Lagebestimmung ist deshalb schwierig. Könnte man die Linien verschmälern, wäre die Lagebestimmung einfacher.

Durch Transformierung der Moiré - Aufnahmen in eine Äquidensitenabbildung können bestimmte Grauwerte einer Moiré - Linie isoliert werden. Versuchsweise wurde eine solche Transformation mit Hilfe des SABATTIER - Effekts durchgeführt. Der Versuch scheiterte aufgrund der Tatsache, daß die Moiré - Linien in Gebieten verschiedener Helligkeit liegen.
Deshalb repräsentieren die Äquidensiten nicht eine bestimmte Stelle innerhalb einer Moiré - Linie. Aus demselben Grund wird ein Teil der Moiré - Linien überhaupt nicht durch Äquidensiten wiedergegeben.

5.6.1. QUALITATIVE AUSWERTUNG

Mit dem Moiré - Verfahren läßt sich von einem dreidimensionalen Objekt auf einem Papierbild ein ziemlich guter räumlicher Eindruck erzielen, der in vielen Fällen ein Gipsmodell ersetzen kann. Aufgrund der Höhenlinienstruktur kann man sehr leicht Erhebungen und Vertiefungen erkennen. Das Ausmaß einer Neigung oder Wölbung ist sofort anhand der Liniendichte feststellbar. Scharfe Kanten und überstehende Füllungsränder können besser als im Original bestimmt werden; außerdem sind Aussagen über den Grad der Höhendifferenz möglich.

Vergleicht man zwei Aufnahmen desselben Objekts vor und nach einer Veränderung, so läßt sich aufgrund der Verteilung der Höhenlinien erkennen, an welchen Stellen Oberflächenveränderungen stattgefunden haben und in welchem Ausmaß sie erfolgt sind. Eleganter läßt sich der Vergleich durchführen, wenn beide Aufnahmen als Film vorliegen, davon einer als Negativ, der andere als Positiv. Die Linien auf dem Film bilden dann miteinander ein Moiré, das den Ort der Veränderung sofort erkennen läßt. So können z.B. Veränderungen in der Stellung eines Zahnes oder Verformung an einem Werkstück dargestellt werden.

5.6.2. QUANTITATIVE AUSWERTUNG

Aufgrund der spezifischen Natur von Höhenlinien ist es möglich, jeden Punkt einer Isohypsenabbildung durch drei Koordinaten wiederzugeben. Bei der Berechnung der Koordinaten aus der Moiré - Aufnahme muß der Tatsache Rechnung getragen werden, daß die Lage einer Moiré - Linie nicht der einer idealen Höhenlinie entspricht. Außerdem liefert jede fotografische Aufnahme ein perspektivisch verzerrtes Bild

des Objekts. Das Ausmaß der perspektivischen Verzeichnung ist vom Abstand der Kamera abhängig.

Bei einer genauen Rechnung müssen deshalb die aus der Aufnahme entnommenen Werte in allen drei Raumrichtungen korrigiert werden. Die Korrekturfaktoren kann man errechnen oder einer grafischen Darstellung entnehmen.

Will man die Koordinaten eines Punktes korrigieren, so geht man zweckmäßigerweise wie folgt vor:
Man bestimmt die Lage des Punktes auf der fotografischen Abbildung anhand eines Koordinatensystems, das seinen Nullpunkt an der Stelle des Durchtrittspunktes der optischen Achse durch das Gitter hat.
Die x - Achse entspricht der Median - Sagittal - Ebene, die y - Achse steht senkrecht dazu. Die z - Achse deckt sich mit der optischen Achse des Aufnahmesystems, steht also senkrecht auf der Gitterebene.

Stehen die Koordinaten $\bar{x}$, $\bar{y}$, $\bar{z}$ eines Punktes fest, so erfolgt als erstes die Korrektur der z - Koordinaten. Dies geschieht um den Betrag, um den die Moiré - Linie gegenüber der idealen Höhenlinie verschoben ist (vgl. Abschn. 5.1.2.), nach der Gleichung:

$$z = \frac{c\bar{x} + c\bar{z} + ba}{a - \bar{z} + \frac{c\bar{x}}{b}} - b \qquad (1)$$

(Diese Gleichung entspricht der Gleichung auf S.22)
$\bar{z}$ ist die gemessene z - Koordinate des Punktes. Sie ergibt sich aus der Ordnungszahl n der betreffenden Moiré - Linie nach der Beziehung $\bar{z} = n \cdot g$, wobei g die Gitterkonstante ist.
Der Wert $\bar{x}$ ist identisch mit u in der Gleichung auf S.22, wie sich aufgrund einer einfachen Überlegung ergibt.

Die x - und y - Koordinaten des Punktes errechnen sich nach den Gesetzen der Zentralprojektion:

$$x = \frac{b + z}{b} \bar{x} \qquad (2)$$

$$y = \frac{b + z}{b} \bar{y} \qquad (3)$$

Dieses rechnerische Vorgehen ist jedoch sehr umständlich und hebt die Vorteile, die das Moiré - Verfahren aufgrund seiner einfachen Technik bietet, teilweise wieder auf. Für Zwecke, die nicht höchste Präzision verlangen, nimmt man die durch perspektivische Verzeichnung bedingten Abweichungen lieber in Kauf und versucht, sie durch die Wahl geeigneter Parameter bei der Aufnahme einzuschränken.

Benutzt man die unkorrigierten Werte, so ist der Fehler bei einer geeigneten Aufnahmeapparatur an einem Gebißmodell am Gaumen ca. 5%, im Bereich der Zähne ca. 2%.

5.6.2.1. Codierung

Um die Lage eines Punktes im Moiré - Bild zu charakterisieren, gibt man zweckmäßigerweise die Ordnungszahl der Moiré - Linie an, auf der der betreffende Punkt liegt. Als Nullinie wählt man dabei entweder die an der Gitterebene gelegene Linie oder die letzte Linie, die auf dem Modell erscheint (z.B. am Gaumen).

Die Orientierung wird erleichtert, wenn auf einem Positiv jede 5. Linie mit einem Tuschestrich markiert und mit einer Ordnungszahl versehen wird. Da die Verfolgung einer bestimmten Höhenlinie bei der Codierung auf Schwierigkeiten stößt, trägt man besser zuerst nur Höhenkoten ein. Sind genügend Koten vorhanden, verbindet

man diese entsprechend dem Verlauf der Moiré - Linien. Auf diese Weise können Fehler schneller entdeckt werden.

Wechseln im Modell Vertiefungen und Erhebungen, so fordert die Codierung viel Aufmerksamkeit und Kombinationsvermögen. Das Ergebnis der Codierung ist ein leicht lesbares Bild der Moiré - Linien (Abb. 5.6 - 1).

Möchte man ein isoliertes Höhenlinienbild erhalten, kann man das Negativ mit Hilfe eines Vergrößerungsgerätes auf ein weißes Blatt Papier oder auf ein Millimeterpapier projizieren und auf dieselbe Weise vorgehen.
Ein Beispiel dafür gibt Abb. 5.6 - 2 und 3. Bei diesem Vorgehen sind Übertragungsfehler allerdings später nicht mehr zu erkennen.

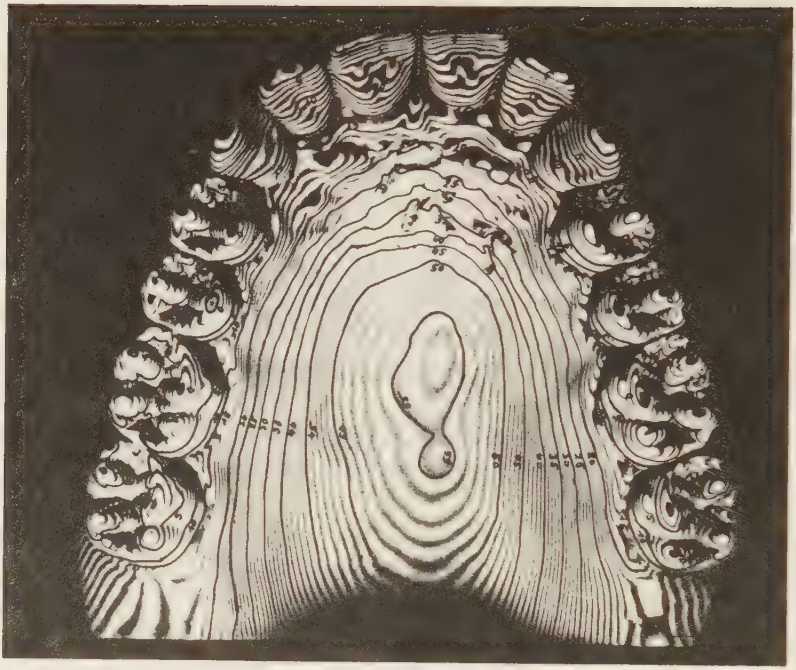


Abb. 5.6. - 1 Codierung eines Moiré - Bildes durch Einzeichnen von Hilfslinien mit Ordnungszahlen. Die Orientierung wird dadurch wesentlich erleichtert.

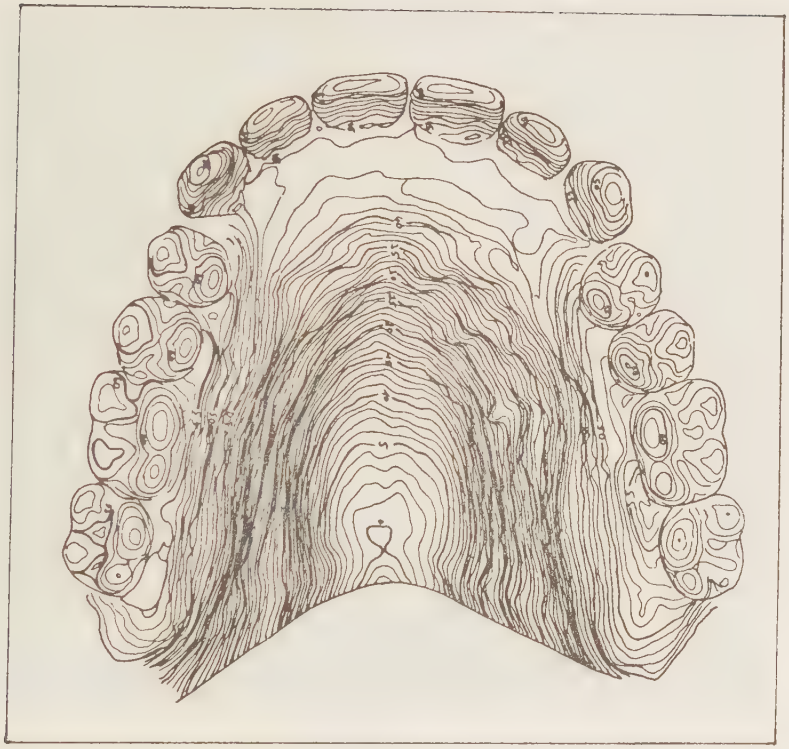
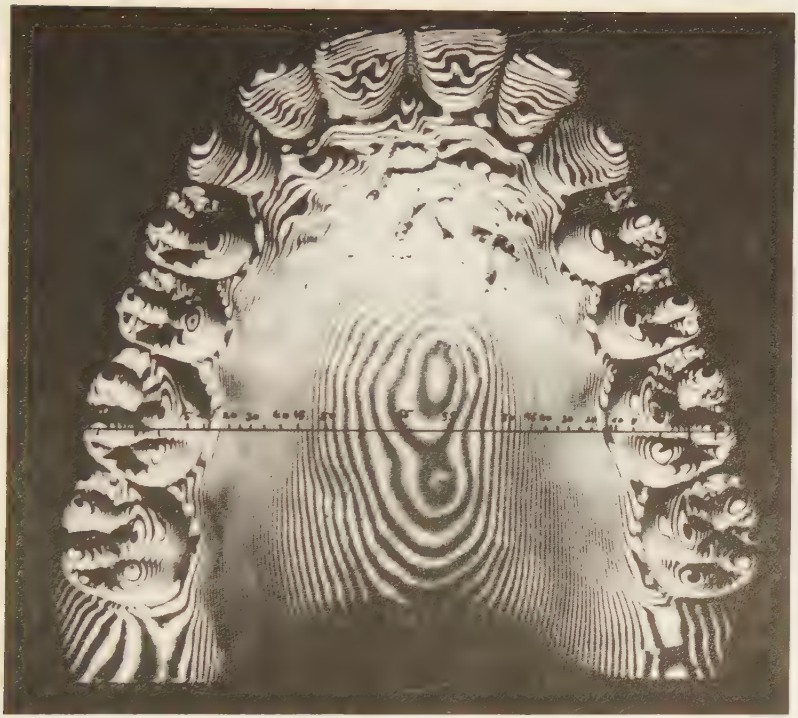


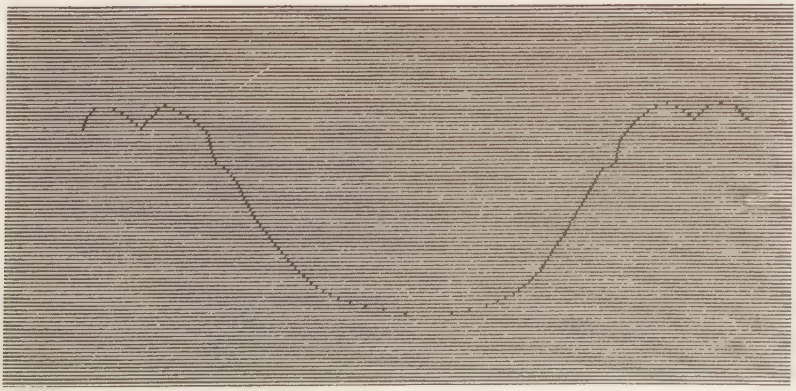
Abb. 5.6. - 2 bis 3
Höhenkarte einer Total-
prothese und einer Krone.
Die Konstruktion erfolgt
durch Projektion einer
Moiré - Aufnahme auf
einen Bildträger und Nach-
ziehen der Linien mit
Tusche.

5.6.2.2. Schnittbilder

Möchte man ein Schnittbild an einer bestimmten Stelle des Objekts zeichnen, so läßt sich dies auf einfache Weise an einem codierten Bild durchführen. Als Zeichenvorlage benutzt man am einfachsten eine Papiervergrößerung des bei der der Aufnahme verwendeten Gitters. Das Gitter wird im selben Maßstab wie das Objekt vergrößert. Die Gittervergrößerung ordnet man dann parallel zur gewünschten Schnittlinie an. Die Kreuzungspunkte der Schnittlinie mit den Höhenlinien brauchen jetzt nur noch orthogonal zur Schnittlinie auf die Gittervergrößerung übertragen zu werden. Ein Beispiel gibt Abb. 5.6. - 4.

Abb. 5.6. - 4 Konstruktion eines Schnittbildes. Als Koordinatensystem dient ein Strichraster, dessen Linienabstand der Tiefendifferenz der Moiré - Linien entspricht. Jeder Rasterstrich ist einer bestimmten Moiré - Linie zugeordnet. Verbindet man eine Moiré - Linie mit dem ihr zugeordneten Rasterstrich durch eine Orthogonale auf die Schnittlinie, so ergibt dies jeweils einen Punkt des Schnittbildes. Die Summe dieser Punkte stellt den Oberflächenverlauf des Objekts in der Schnittebene dar.





5.7. ANWENDUNG DES MOIRÉ - VERFAHRENS

An drei Beispielen soll gezeigt werden, wie sich das Moiré - Verfahren im Bereich der Zahnmedizin einsetzen läßt.

Die hier exemplarisch dargestellten Fälle sollen lediglich die Möglichkeiten des Moiré - Verfahrens demonstrieren. Keineswegs können daraus allgemeingültige Schlüsse über die dabei angeschnittenen Probleme gezogen werden. Dazu waren die Versuchsbedingungen zu ungenau und das Untersuchungsgut zu klein.
Bei den Abbildungen wurde bewußt auf einen Maßstab verzichtet, da es die in diesem Fall angewandte Technik der Aufnahme und der Auswertung nicht erlaubt, maßstabsgetreue Schnittbilder herzustellen.

5.7.1. FORMVERHALTEN EINER KUNSTSTOFFPROTHESE

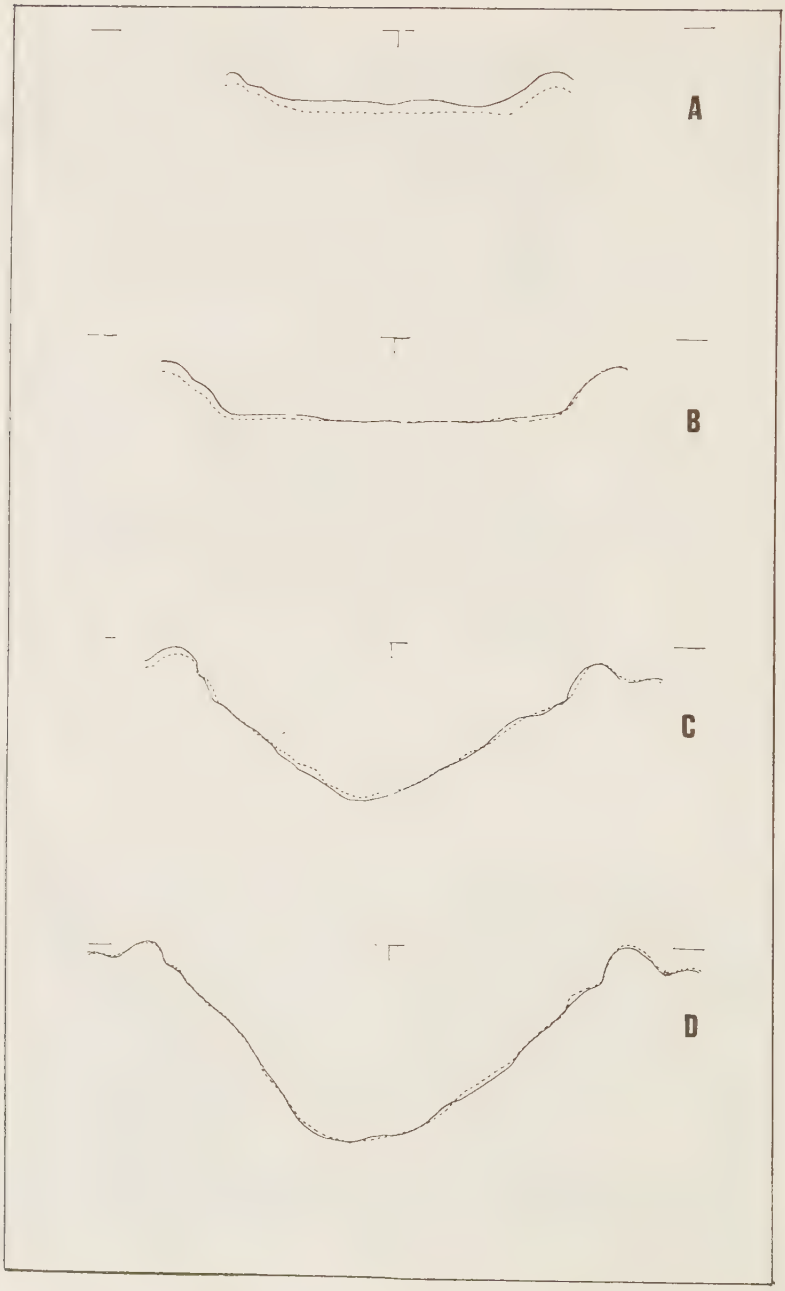
Um die Verformungen darzustellen, denen eine Totalprothese des Oberkiefers während des Polymerisationsvorganges unterliegt, wurden von einem willkürlich aus dem Labor geholten Werkstück zwei Moiré - Aufnahmen angefertigt. Die eine Aufnahme erfaßt die Modellation der Prothese und die Aufstellung der Zähne in Wachs. Die zweite Moiré - Aufnahme gibt die Prothese nach der Überführung in Kunststoff wieder. Die Polymerisation erfolgte in der üblichen Weise im Wasserbad. Bei der Aufnahme befand sich die Prothese in unausgearbeitetem Zustand und war vom Modell abgehoben.
Zum Vergleich der beiden Moiré - Aufnahmen werden Schnittbilder in jeweils identischen Ebenen konstruiert (vgl. Abschn. 5.6.2.2.)
Die Gegenüberstellung jeweils zweier Schnittbilder läßt deutlich Ausmaß und Lokalisation von Verformungen erkennen (Abb. 5.7. - 1)

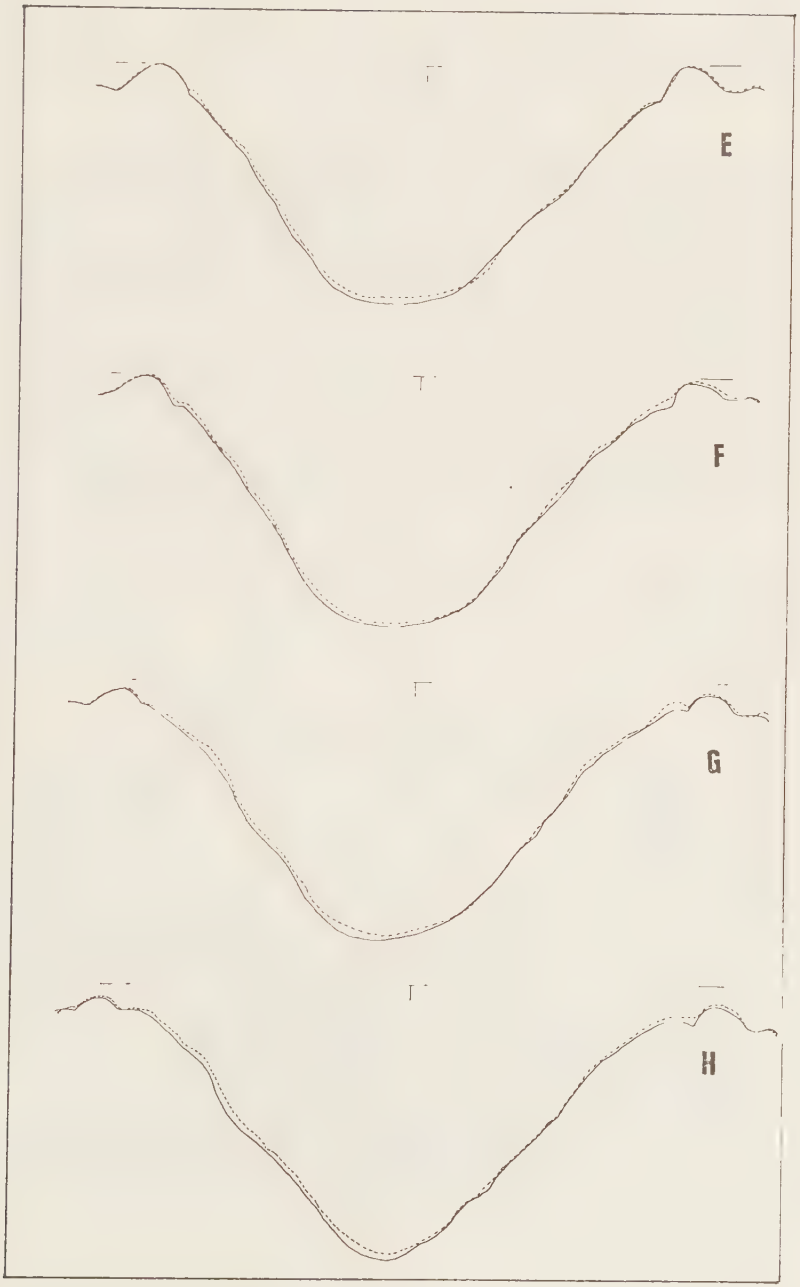
Abb. 5.7. - 1 (nächste Seite)

Schnittbilder durch eine Totalprothese des Oberkiefers vor und nach der Polymerisation. Die durchgezogene Linie zeigt das Schnittbild der Prothese in Wachs, die gestrichelte Linie gibt den Oberflächenverlauf nach der Polymerisation und bei vom Modell abgehobener Prothese wieder. Auf diese Weise zeigen sich Stellungsänderungen der Zähne, Verformungen des Prothesenkörpers und Oberflächenveränderungen wie z.B. Abflachung von Gaumenfalten oder das Auftreten von Blasen.

Schnittbild A: regio 2
B: regio 3
C: regio 4
D: regio 5
E: regio 6 mesial
F: regio 6 distal
G: regio 7 mesial
H: regio 7 distal

Die waagrechten Markierungen zeigen die Gitterebene, die senkrechte Markierung entspricht einer konstruierten Mittellinie.


A
B
C
D


E
F
G
H

5.7.2. VERGLEICH VON ABDRUCKMATERIALIEN

Anhand von Schnittbildern, die aus Moiré - Aufnahmen entstanden, soll gezeigt werden, wie die Form eines Kiefers von verschiedenen Abdruckmaterialien bzw. -methoden wiedergegeben wird. Dazu wurden bei einem Probanden vom Oberkiefer drei Abdrücke genommen: ein Doppelmischabdruck und ein Korrekturabdruck aus Silikonmasse sowie ein Alginatabdruck. Die drei Abdrücke wurden ausgegossen und von den entstandenen Modellen Moiré - Aufnahmen hergestellt. Abb. 5.7. - 2 zeigt die daraus gewonnenen Schnittbilder in Gegend der 6er. An diesen Schnittbildern fällt auf, daß vor allem die Drüsen- und Fettgewebszone in unterschiedlichen Kompressionszuständen wiedergegeben wird.

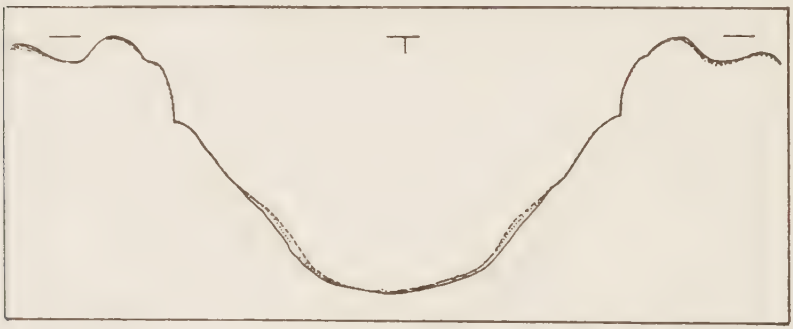


Abb. 5.7. - 2 Schnittbilder durch drei Oberkiefermodelle in Gegend der 6er. Die Modelle entstanden durch verschiedene Abdruckverfahren:

—— Modell 1: Korrekturabdruck aus Silikonmasse
---- Modell 2: Doppelmischabdruck aus Silikonmasse
.... Modell 3: Alginatabdruck

Die Unterschiede der verschiedenen Verfahren zeichnen sich im Schnittbild hauptsächlich in der Wiedergabe der Drüsen- und Fettgewebszone ab.

5.7.3. SCHLIFFFLÄCHEN

Schliffflächen präsentieren sich dem Betrachter einer Moiré - Aufnahme als Bezirke mit homogener Moiré - Struktur und gut erkennbarer Abgrenzung, die sich in einer Abknickung der Linien äußert. Isoliert man diese Schliffflächen durch eine Maskierung der übrigen Bildteile, so entsteht das in Abb. 5.7. - 3 wiedergegebene Bild. Die dabei erkennbaren Moiré - Strukturen sprechen dafür, daß es sich bei den Abrasionen um ebene Flächen oder um Segmente einfacher Raumkörper handelt.
Ein räumlicher Zusammenhang zwischen den einzelnen Schliffflächen müßte sich in einer Kontinuität der Moiré - Strukturen ausdrücken. Eine solche Kontinuität ist jedoch in Abb. 5.7. - 3 nicht zu erkennen.

Abb. 5.7. - 3 Schliffflächen. Die übrigen Bildteile sind maskiert. Die Form und räumliche Lage der Schliffflächen sind gut erkennbar.
Aus der Tatsache, daß sich die Moiré - Linien der einzelnen Schliffflächen nicht miteinander in Verbindung bringen lassen, läßt sich der Schluß ziehen, daß zwischen den einzelnen Flächen kein räumlicher Zusammenhang besteht.

5. DISKUSSION

Ziel der Untersuchung war es, zu prüfen, ob und in welcher Weise sich der Moiré - Effekt zur Analyse von zahnärztlichen Modellen und Werkstoffen einsetzen läßt.

Auf den ersten Blick liefert das Moiré - Verfahren die gleichen Ergebnisse wie das Isohypsenverfahren nach FENEIS (7). Bei genauer Betrachtung zeigen sich jedoch gewisse Unterschiede: Beim Verfahren nach FENEIS wird das Objekt Schritt für Schritt vermessen und auf diese Weise eine Höhenlinienkarte konstruiert. Aus dieser Höhenlinienkarte ist sofort jeder Meßwert exakt entnehmbar. Die Herstellung einer Höhenkarte mit hoher Liniendichte erfordert vermutlich einen großen Zeitaufwand. Bei der Moiré - Methode ist die Herstellung eines Linienbildes dagegen nicht sehr zeitaufwendig. Erst die Entnahme von Meßwerten verlangt einen größeren Aufwand, der mit den Ansprüchen auf Genauigkeit steigt.

Andere Verfahren (BROOKS (4.), FINSTERWALDER (8.), LACMANN (12.), LENK (13), SCHWIDEFSKY (16.), TSURUTA (19.), VIERLING (20.)) sind bisher nicht auf zahnärztliche Modelle angewandt worden. Diese Methoden erfordern z.T. einen recht hohen apparativen Aufwand; es ist jedoch denkbar, daß sich die Meßgenauigkeit damit steigern läßt.

Besonders geeignet ist die Moiré - Methode für eine Betrachtung im Sinne einer qualitativen Analyse. Dank des dichten Verlaufs der Moiré - Linien lassen sich exakte Aussagen über die Oberflächengestalt des abgebildeten Körpers machen. Veränderungen der Oberflächengestalt können durch den Vergleich zweier Moiré - Aufnahmen genau lokalisiert werden.

Die quantitative Auswertung einer Moiré - Aufnahme stößt auf einige Schwierigkeiten. Hat man keinen fest montierten und genau eingestellten Aufbau, dessen Einflüsse auf die Lage der Moiré - Linien durch Versuchsaufnahmen geklärt sind, ist eine quantitative Auswertung nicht möglich. Wie die Rechnung zeigt, sind die Abweichungen von einem idealen Verlauf der Moiré - Linien in Gitternähe nicht sehr groß. Hier liegen normalerweise die Kaufläche. Die auf ihnen abgebildeten Moiré - Linien sind annähern parallel und haben gleiche Abstände. Die perspektivischen Verzeichnungen sind sehr gering. Quantitative Vergleiche in diesem Gebiet sind also sinnvoll. Allerdings sollte man, wenn nicht genaue Eichaufnahmen vorliegen, den Abstand der Moiré - Linien nicht durch Meterangaben ausdrücken, sondern die Ordnungszahl der Linien als Maßstab heranziehen.

Werden die in der Untersuchung als günstig ermittelten Versuchsbedingungen eingehalten, so läßt sich mit der Moiré - Methode ein Ergebnis erreichen, das den gestellten Anforderungen entspricht. Stets sollte man sich jedoch darüber im Klaren sein, daß die fotografische Wiedergabe der auf dem Modell abgebildeten Linien keine Höhenlinienkarte mit maßstäblich genauer Abbildung aller Punkte ist. Die Verformungen, denen die Moiré - Linien durch die optischen Gegebenheiten unterliegen, können aber durch die Wahl einer geeigneten Apparatur weitgehend verkleinert werden. Sie sind allerdings nicht völlig auszuschalten, möchte man nicht andere Nachteile in Kauf nehmen.

7. ZUSAMMENFASSUNG

Die vorliegende Arbeit untersucht die Anwendungsmöglichkeiten einer optischen Methode zur Darstellung von Höhenlinien auf zahnärztlichen Modellen und Werkstoffen. Die Höhenlinien entstehen durch den Moiré - Effekt und können auf fotografischem Wege festgehalten werden.

Die Untersuchung versucht zu klären, in welchem Umfang Moiré - Linien auf einem zahnärztlichen Modell erzeugt werden können und welche Grenzen in der Anwendung sich daraus ergeben. Unter optimalen Bedingungen läßt sich ein gesamtes Gebißmodell durch Linien im Abstand von ca. 250 µm erfassen, das Modell wird also von 60 - 70 Linien geschnitten. Teile des Modells oder kleinere Objekte lassen sich mit einem Linienabstand von ca. 100 µm abbilden. Unter günstigen Voraussetzungen kann so die Tiefendifferenz in der Lage zweier Punkte auf 25 µm genau angegeben werden.

Durch die endliche Entfernung von Kamera und Beleuchtung ergeben sich Abweichungen der Moiré - Linien vom Verlauf idealer Höhenlinien. Die Abweichungen können berechnet werden. Sie sind im Bereich der Kauflächen am geringsten. Bei günstiger Versuchsanordnung betragen die Abweichungen am Gaumendach ca. 5%.
Die perspektivische Verzeichnung des fotografischen Bildes sollte deshalb ebenfalls berücksichtigt werden.

Um die Schärfe und Tiefenausdehnung der Moiré - Linien zu vergrößern, muß die Apertur von Kamera und Beleuchtung klein gehalten werden. Die Annäherung an ein ideales Höhenlinienbild gelingt, wenn Kamera und Beleuchtung einen großen Abstand vom Objekt haben.

Einen großen Einfluß auf das Entstehen eines Moiré - Bildes hat die Beschaffenheit des Gitters. Die optischen Erscheinungen an den Gitterbestandteilen begrenzen die Tiefenausdehnung, die Schärfe und den Kontrast der Moiré - Linien. Ein stationäres Gitter verdeckt die Struktur der Moiré - Linien. Erst die Bewegung des Gitters liefert störungsfreie Bilder.

Glänzende und dunkelfarbene Oberflächen eignen sich nicht als Träger für ein Moiré - Bild. Sie müssen mit Magnesiumoxid beschichtet werden.

Zur fotografischen Registrierung eignet sich ein mittelempfindliches Material mit einem Gamma von 0,7.

Es sind verschiedene Arten der Auswertung eines Moiré - Bildes möglich. Notwendig ist auf jeden Fall die Codierung des Bildes. Dadurch gewinnt die Aufnahme an Übersichtlichkeit.

Am Beispiel einiger zahnmedizinischer Probleme werden die Anwendungsmöglichkeiten des Verfahrens demonstriert.

Das Verfahren ist besonders geeignet zur qualitativen Analyse von Oberflächencharakteristika und zur Feststellung von Veränderungen der Oberfläche. Aufgrund des geringen Zeitaufwandes können Reihenuntersuchungen durchgeführt werden. Bei einem normierten Versuchsaufbau eignet sich das Verfahren aber auch zu Meßzwecken. Besonders im Bereich der Kauflächen ist die Genauigkeit ausreichend groß.

8. LITERATURVERZEICHNIS

1. BAIER, W. — Optik, Perspektive und Rechnung in der Fotografie. 3. Auflage. Fachbuchverlag Leipzig 1959

2. BARFORD, N.C. — Kleine Einführung in die statistische Analyse von Meßergebnissen. Akademische Verlagsgesellschaft Frankfurt/Main 1970

3. BAWENDI, B., I. COCA und H. SCHWICKHERATH — Ist eine Prüfung der Formveränderung von Prothesenbasismaterialien sinnvoll? Dtsch. Zahnärztl. Z. 30, 660 - 664 (1975)

4. BROOKS, R.E. and L.O. HEFLINGER — Moiré gauging using optical interference patterns. Applied Optics 8, 935 - 939 (1969)

5. CHARTER, W.H. — Aliasing in sampled holograms. Proc. IEEE 56, I, 96 - 98 (1968)

6. DIEDRICH, U. — Methoden der Film- und Photoanalyse. Band 1: Photoanalyse. Deutscher Verlag der Wissenschaften Berlin 1966

7. EBERT, M. Die Erfassung der menschlichen Trochlea tali mit Hilfe des Isohypsenverfahrens
Dissertation, Tübingen 1967

8. FINSTERWALDER, S. und W. HOFMANN Photogrammetrie
Walter de Gruyter & Co.
Berlin 1968

9. HOFMANN, W. Geländeaufnahme, Geländedarstellung
Westermann
Braunschweig 1971

10. KARPF, N. Linhof Praxis
3. Auflage
Verlag Großbild - Technik
München 1963

11. KRUG, W. und H.G. WEIDE Wissenschaftliche Photographie in der Anwendung
Akademische Verlagsgesellschaft
Leipzig 1972

12. LACMANN, O. Die Photogrammetrie in ihrer Anwendung auf nicht topographischen Gebieten
S. Hirzel - Verlag
Leipzig 1950

13. LENK, H. Holographie
VEB Georg Thieme
Leipzig 1969

14. OSRAM
Quecksilberdampfhöchstdrucklampen
Informationsschrift der Fa. Osram
1963

15. OSTER, G. and Y. NISHIJIMA
Moiré patterns
Sci. Amer. 208, 54 - 63
(1963)

16. SCHWIDEFSKY, K.
Grundriß der Photogrammetrie
4. Auflage
Verlag für Wissenschaft und Fachbuch
Bielefeld 1950

17. STEINHILBER, W.
Beeinflußt das Kiefergelenk die
Abrasionsform der Zähne?
Dissertation, Tübingen 1970

18. TAKASAKI, H.
Moiré topography
Applied Optics 9, 1467 - 1472
(1970)

19. TSURUTA, T. and Y. ITOH
Interferometric generation of
counter lines on opaque objects
Optics communications 1, 34 - 36
(1969)

20. VIERLING, O.
Die Stereoskopie in der Photographie
und Kinematographie
Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft
Stuttgart 1965

LEBENSLAUF

Am 24. Februar 1953 wurde ich, Wolfgang Tetzlaff, als Sohn des Dipl.-Ing. Edwin Tetzlaff und der Liselotte Tetzlaff in Tübingen geboren.

Seit 1960 besuchte ich die Grundschule, bis ich 1964 in das Kepler - Gymnasium Tübingen eintrat. Dort erwarb ich 1972 das Abitur.

Zum Wintersemester 1972/73 immatrikulierte ich mich an der Eberhard - Karls - Universität zu Tübingen für das Fach Zahnmedizin. Die naturwissenschaftliche Vorprüfung legte ich am 26. September 1973 ab, die zahnärztliche Vorprüfung am 14. April 1975. Ich beendete mein Studium mit dem Staatsexamen am 7. Dezember 1977.

Seit 1976 beschäftigte ich mich unter der Anleitung von Prof. Dr. H. Haselmann, Direktor des Instituts für Wissenschaftliche Mikroskopie und Prof. Dr. E. Körber, Leiter der Abteilung für zahnärztliche Prothetik der Klinik und Poliklinik für Zahn-, Mund- und Kieferkrankheiten Tübingen mit optischen Verfahren zur Erfassung von Oberflächenstrukturen und ihren Anwendungsmöglichkeiten auf zahnmedizinischem Gebiet.

ifo druck
laubanger 15
8600 bamberg
tel.: 0951/64321